



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 الإلكتروميكانيك
Département Electromécanique



MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention d'un diplôme de Master

Filière : Electromécanique

Option : Maintenance Industrielle

Maintenance et Diagnostic Des Défauts d'un Véhicule Électrique

Par

Youcef GHOUL & Samir MALAOU

Devant le jury :

MOGHRANI Redouane	MAA	Président	Université Larbi TebessiTébessa
ATTIA Moussa	MCB	Encadreur	Université Larbi TebessiTébessa
SOUDANI Mohamed Salah	MAA	Examineur	Université Larbi TebessiTébessa

Promotion 2022-2023



Année universitaire : 2022-2023

Tébessa le : 07/06/2023

Lettre de soutenabilité

Noms et prénoms des étudiants :

* Ghoul youcef

* Malaoui samir

Niveau : Master 2

Option : Maintenance industrielle

Thème : Maintenance et diagnostique des défauts d'un véhicule électrique

Nom et prénom de l'encadreur : Moussa ATTIA

Chapitres réalisés	Signature de l'encadreur
Chapitre 1: Généralités sur les véhicules électriques	 07/06/2023 Dr. ATTIA. M
Chapitre 2: Généralités sur la maintenance	
Chapitre 3: Diagnostique des défauts d'un véhicule électrique	
Chapitre 4: Partie pratique	

تصريح شرفي
خاص بالالتزام بقواعد النزاهة العلمية لانجاز بحث

أنا الممضي أدناه،

السيد (ة)..... غول حسنة..... الصفة : طالب، أستاذ باحث، باحث دائم : طالب

الحامل لبطاقة التعريف الوطنية رقم : 4.04.792023 .. و الصادرة بتاريخ 19.02.2023

المسجل بمعهد السلام قسم كهرباء ميكانيك

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

Maintenance et diagnostic des defauts d'un
vehicule electrique

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

التاريخ: 2023/06/08

إمضاء المعني (ة)



08 جوان 2023


أنا رومين الممضي المعني التصريح الشرفي
و أؤيد التصريح بالتصريح
بإمضاء المعني بالتصريح
تسليم البحث المذكور

مؤسسة التعليم العالي : جامعة العربي التبسي - تبسة

تصريح شرفي
خاص بالالتزام بقواعد النزاهة العلمية لانجاز بحث

أنا الممضي أدناه،

السيد (ة) جلال الدين دبرجيد الصفة : طالب، أستاذ باحث، باحث دائم : طالب

الحامل لبطاقة التعريف الوطنية رقم : 1024.116.76 و الصادرة بتاريخ 2016.1.12.120

المسجل بمعهد المحتاج قسم كهر وميكانيك

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

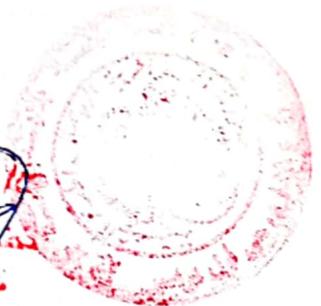
Maintenance et diagnostic des defauts d'un
vehicule electrique

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

التاريخ: 2023/06/08

إمضاء المعني (ة)

08 جوان 2023



© *Mémoire effectué au sein du
Laboratoire de l'environnement*



Maintenance et diagnostique des défauts d'un véhicule électrique

Ghoul Youcef, Malaoui Samir¹²

¹youcefghoul04@gmail.com

²samirmalaoui9@gmail.com

ملخص

يعد الانتقال إلى السيارات الكهربائية أمرًا ضروريًا للحد من التلوث البيئي. يسلط هذا البحث الضوء على أهمية الصيانة والتشخيص لضمان موثوقية المركبات الكهربائية. تغطي الفصول مقدمة إلى السيارات الكهربائية ، والصيانة الصناعية ، وتشخيص الأعطال ، وتطبيق طرق الصيانة لتحسين الأداء. من خلال دمج هذه المجالات ، نزيد من الكفاءة التشغيلية للمركبات الكهربائية ونساهم في التنمية المستدامة. تقدم السيارات الكهربائية العديد من الفوائد ، ولكن لا تزال هناك تحديات. ومع ذلك ، مع الابتكار التكنولوجي والالتزام بالاستدامة ، يمكننا خلق مستقبل أنظف وأكثر استدامة.

الكلمات المفتاحية: سيارات كهربائية (EV) ، صيانة ، تشخيص ، تنمية مستدامة.

Abstract

The transition to electric vehicles is essential to reduce environmental pollution. This research highlights the importance of maintenance and diagnostics to ensure the reliability of electric vehicles. The chapters cover the introduction to electric vehicles, industrial maintenance, fault diagnosis and the application of maintenance methods to improve performance. By integrating these areas, we maximize the operational efficiency of electric vehicles and contribute to sustainable development. Electric vehicles offer many benefits, but challenges remain. However, with technological innovation and a commitment to sustainability, we can create a cleaner, more sustainable future.

Keywords: Electric vehicles (EV), Maintenance, Diagnosis, Sustainable development.

Résumé

La transition vers les véhicules électriques est essentielle pour réduire la pollution environnementale. Cette recherche met en évidence l'importance de la maintenance et du diagnostic pour assurer la fiabilité des véhicules électriques. Les chapitres abordent l'introduction aux véhicules électriques, la maintenance industrielle, le diagnostic des défaillances et l'application de méthodes de maintenance pour améliorer les performances. En intégrant ces domaines, nous maximisons l'efficacité opérationnelle des véhicules électriques et contribuons au développement durable. Les véhicules électriques offrent de nombreux avantages, mais des défis subsistent. Cependant, avec l'innovation technologique et l'engagement envers la durabilité, nous pouvons créer un avenir plus propre et plus durable.

Mots clés : Véhicules électriques (VE), Maintenance, Diagnostic, Développement durable.

Dédicace

À Je voudrais exprimer ma gratitude à Allah pour m'avoir aidé à faire cet humble travail. Je dédie ce travail à mes chers parents, pour tout ce qu'ils ont fait pour moi. Leur soutien moral et matériel, leurs encouragements et leur patience ont été précieux. Je dédie également ce travail à ma chère mère, qui m'a donné espoir, courage et amour. Je leur suis reconnaissant de leur soutien moral et matériel, de leur tendresse et des encouragements qu'ils m'ont apportés tout au long de mon parcours.

J'adresse également cette dédicace à ma chère sœur et à mon frère Anouar, Ala et Idris. Votre présence et vos soutiens ont été inestimables.

Enfin, je voudrais dédier ce travail à tous mes amis. Votre amitié et votre soutien ont été d'une grande

MALAOUI

Samir

Dédicace

*Je dédie ce modeste travail A mon père , la source de ma force, A ma mère ,
la source de tendresse,*

*JA mon encadreur Moussa ATTIA, A mes frères Ridha, Mohamed et Taha .et
Karim et A, Samir mon pote ;*

Je dédié cet humble travail

GHOU

Youcef

Remerciements

Dieu merci, nous avons fait ce travail et nous ne pouvons que remercier tous ceux qui ont Couronné le travail en cours.

Nous revenons à remercier tous et particulièrement :

- Dr. ATTIA Moussa.

Merci pour les conseils productifs et son bon encadrement, et pour toutes les notes liées à ce Travail. Nous venons également à remercier les membres du jury qui nous ont donné le privilège D'accepter de juger cet humble travail.

Table des matières

ملخص	i
Abstract	ii
Résumé	iii
Dédicace 1	iv
Dédicace 2	v
Remerciements	vi
Liste des Tableaux	xi
Liste des Figures	xii
Les Chapitres	
1 Généralités sur les véhicules électriques	3
1.1 Introduction	3
1.2 Historique	3
1.3 Aperçu de la prévalence actuelle des voitures électriques	5
1.4 Définition	6
1.5 Différents types de voitures électriques	6
1.5.1 Véhicules tout électrique (VTE)	7
1.5.2 Véhicules électriques à batterie rechargeable par prise de courant	7
1.5.3 Véhicules électriques à alimentation par pile à combustible	7
1.5.4 Véhicules hybrides	8
1.5.5 Véhicules hybrides série	8
1.5.6 Véhicule hybride parallèle	9
1.5.7 Véhicule hybride combiné	9
1.6 Composants d'un véhicule électrique et son fonctionnement	10
1.6.1 Les sources d'énergie	10
1.6.1.1 la batterie	10
1.6.1.2 Différentes Types de batteries	11
1.6.1.3 Super condensateurs	14

1.6.1.4	Accumulateur	15
1.6.2	Système de propulsion électrique	16
1.6.2.1	Moteur électrique	16
1.6.2.2	Fonctionnement du moteur électrique	17
1.6.2.3	Convertisseur de puissance	19
1.6.2.4	Commande des convertisseurs de puissances	19
1.6.2.5	Auxiliaire	20
1.6.3	Système de chargement	20
1.6.3.1	Chargeurs	21
1.6.3.2	Types des Connecteurs de véhicule électrique	23
1.6.3.3	Types de sources de chargement des véhicules électriques	23
1.6.4	Système de freinage	24
1.6.4.1	Freinage régénératif	24
1.6.4.2	Freinage mécanique traditionnel	25
1.6.5	Différentes architectures de traction	26
1.6.5.1	Véhicules électriques mono moteur (machine à courant continu)	26
1.6.5.2	Véhicules électriques moteur (machine à courant alternatif)	26
1.6.6	Transmission	27
1.6.7	Calculateur de puissance	28
1.7	L'impact des voitures électriques sur le monde	28
1.8	Principales différences entre les voitures électriques et les voitures thermiques	29
1.9	Comparaison des émissions	30
1.10	Avantages et inconvénient des véhicules électriques	32
1.10.1	Avantages	32
1.10.2	Inconvénients	32
1.11	conclusion	32
2	Généralités sur la maintenance industrielle	34
2.1	Introduction	34
2.2	Définition de la maintenance industrielle	34
2.3	Différents types de maintenance	35
2.3.1	Maintenance préventive	35
2.3.1.1	Maintenance préventive systématique	35
2.3.1.2	Maintenance préventive conditionnelle	36
2.3.2	Maintenance corrective	36
2.3.2.1	Maintenance palliative	36
2.3.2.2	Maintenance curative	36
2.4	Niveau de maintenance	36
2.4.1	Maintenance de Niveau 1	37
2.4.2	Maintenance de Niveau 2	37
2.4.3	Maintenance de Niveau 3	37
2.4.4	Maintenance de Niveau 4	37
2.4.5	Maintenance de Niveau 5	38
2.5	Objectifs principaux, spécifiques et opérationnels d'une maintenance industrielle	38
2.6	Politiques et stratégies de maintenance	38
2.6.1	Politique de maintenance	38

2.6.2	Stratégie de maintenance	38
2.7	Analyse du système de maintenance	39
2.7.1	Missions du service maintenance	39
2.7.2	Fonctions d'un système de maintenance	39
2.7.3	Systèmes d'information et la maintenance	40
2.7.3.1	Qu'est-ce qu'un logiciel GMAO	40
2.7.3.2	Rôle d'une GMAO	40
2.7.3.3	Avantages de la GMAO	41
2.8	Outils méthode maintenance : 8 techniques à connaître	41
2.8.1	Outil méthode maintenance 1 : la TPM	42
2.8.2	Outil méthode maintenance 2 : le PDCA	42
2.8.3	Outil méthode maintenance 3 : le diagramme d'Ishikawa	43
2.8.4	Outil méthode maintenance 4 : le QQQQCCP	43
2.8.5	Outil méthode maintenance 5 : Pareto ou l'analyse ABC	44
2.8.6	Outil méthode maintenance 6 : l'AMDEC	44
2.8.6.1	Pourquoi l'AMDEC maintenance?	44
2.8.6.2	Différents types d'AMDEC	45
2.8.7	Objectif de l'AMDEC	45
2.8.8	Outil méthode maintenance 7 : le kaizen	46
2.8.9	Outil méthode maintenance 8 : l'outil Méride	46
2.9	Rôle de la maintenance	46
2.10	Elaboration un plan de maintenance efficace	47
2.11	conclusion	47
3	Diagnostic des défauts d'un véhicule électrique	49
3.1	Introduction	49
3.2	Sûreté de fonctionnement	49
3.2.1	Définitions	49
3.2.2	Entraves à la sûreté de fonctionnement	50
3.2.3	Aspects sur la sûreté de fonctionnement	51
3.2.4	La sûreté de fonctionnement d'un véhicule électrique	51
3.3	Diagnostic	52
3.3.1	définition	52
3.3.2	Type de diagnostic	53
3.3.2.1	Diagnostic de conformité	53
3.3.2.2	Diagnostic des performances	53
3.3.2.3	Diagnostic des processus	53
3.3.2.4	Diagnostic des risques	53
3.3.2.5	Diagnostic des compétences	53
3.4	Relation entre la SDF et le diagnostic	54
3.5	les défauts	54
3.6	Diagnostic d'un véhicule électrique	55
3.6.1	Définition	55
3.6.2	Types de diagnostic d'un véhicule électrique	55
3.6.2.1	Diagnostic logiciel	55
3.6.2.2	Diagnostic manuel par des équipements	55

3.6.2.3	Diagnostic des pannes mécaniques	55
3.6.2.4	Diagnostic des pannes électriques	56
3.6.2.5	Diagnostic sonore	56
3.6.3	Processus de diagnostic d'un véhicule électrique	56
3.6.3.1	Collecte d'information	56
3.6.3.2	Analyse des codes d'erreur	56
3.6.3.3	Inspection visuelle et des tests des composants	58
3.6.3.4	Interprétation des résultats	59
3.7	Diagnostic des élément principale	60
3.7.1	batterie	60
3.7.2	moteur électrique	61
3.7.3	Diagnostic de convertisseur	62
3.7.4	Diagnostic de système de chargement	62
3.7.5	Diagnostic du système de refroidissement	63
3.7.6	Diagnostic de système de suspension	64
3.7.7	Diagnostic de Système de freinage	64
3.7.8	Diagnostic de système de sécurité	65
3.7.9	Diagnostic de système d'éclairage	66
3.8	Outils utiliser dans le diagnostic	66
3.8.1	Outils de mesure et de contrôle	66
3.8.2	Outils de diagnostic électronique	68
3.9	Centres de diagnostic au monde	71
3.10	Importance de diagnostic pour les véhicules électrique	72
3.11	Conclusion	72
4	Partie pratique	74
4.1	Introduction	74
4.2	Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité	74
4.2.1	Définition de l'AMDEC	74
4.2.2	Principe de l'AMDEC	74
4.2.3	Mise en ouvre	75
4.2.4	Exploitation de l'AMDEC	76
4.2.4.1	Livret des points critiques	76
4.2.4.2	Colonnes « modification » sur le tableau AMDEC	76
4.2.4.3	L'AMDEC et la (re)conception	76
4.2.5	Différentes étapes de L'AMDEC	77
4.2.5.1	Constituer l'équipe de travail	77
4.2.5.2	Analyse fonctionnelle	77
4.2.5.3	Etude qualitative des défaillances	78
4.2.5.4	Etude quantitative	78
4.2.5.5	La hiérarchisation	79
4.2.5.6	Recherche des actions préventives/correctives	79
4.2.5.7	Suivi des actions prises et la réévaluation de criticité	79
4.2.5.8	Présentation des résultats	79
4.2.6	DEMARCHE AMDEC	79
4.2.6.1	Initialisation	79

4.2.6.2	Analyse fonctionnelle « AF »	79
4.2.6.3	Analyse des défaillances	80
4.2.6.4	Cotation de criticité	81
4.2.6.5	Actions menées	83
4.3	Analyse du véhicule électrique par la méthode AMDEC	84
4.3.1	Constatations	88
4.4	Résultats et Interprétations	89
4.4.1	Pack de batterie	89
4.4.2	Moteur synchrone à aimant permanent (MSAP) pour la traction	91
4.4.3	Convertisseur de puissance - Onduleur triphasé	94
4.5	Dusscusion	95
4.6	Résultats	96
4.7	Conclusion	97

Liste des tableaux

Table	page
1.1 Tableau comparatif des technologies des batteries	14
1.2 Puissances consommées par les auxiliaires des véhicules conventionnel.	20
1.3 comparaison	22
1.4 D' différents capteurs d'une voiture électrique	28
1.5 Les différences entre les VE et VMCI	30
1.6 Bilan carbone électrique vs essence (pour une durée de vie de 150 000 Km)	31
2.1 Les types d' amdec	45
4.1 AMDEC d'un système de propulsion	75
4.2 Grille de cotation de la fréquence.	81
4.3 Grille de cotation de la probabilité de non détection	82
4.4 Grille de cotation de la gravité	83
4.5 Tableau de la criticité	83
4.6 AMDEC du cas d'application	84
4.7 Types de maintenance appliquer sur les VE	89
4.8 Système de sécurité du pack de batteries : détection et protection.	90
4.9 Causes de défaillance et tâches de maintenance préventive pour le pack de batteries Li-Ion	91
4.10 Causes de défaillance et tâches de maintenance préventive pour le moteur d'un vehicule électrique	92
4.11 Causes de défaillance pour chaque composant du moteur électrique	94
4.12 Causes de défaillance et tâches de maintenance préventive pour le dispositif d'onduleur	95

Liste des Figures

Figure	page
1.1 1 ^{er} prototype Voiture électrique, Robert Anderson dans les années 1830	4
1.2 La première voiture hybride	4
1.3 La Tesla Model S	5
1.4 Voiture électrique	6
1.5 Principe de fonctionnement de la pile à combustible	8
1.6 Véhicule hybride série	8
1.7 - Véhicule hybride parallèle	9
1.8 - Véhicule hybride combiné	10
1.9 Voiture électrique démontée	10
1.10 batterie de traction d'un véhicules électrique	11
1.11 Batteries lithium-ion	13
1.12 Composition d'un super condensateur	15
1.13 moteur	17
1.14 principe de base d'un moteur électrique	18
1.15 voiture électrique en charge	21
1.16 câble de chargement Tesla S	21
1.17 Durée théorique de recharge complète pour un véhicule électrique	22
1.18 la recharge des vehicules electrique	24
1.19 Freinage régénératif	25
1.20 Architecture d'un véhicule électrique mono moteur	26
1.21 Architecture d'un véhicule électrique bi moteur.	27
1.22 transmission	27
2.1 Différents types de maintenance	35
2.2 Le contenu fonctionnel d'un système de maintenance	40
2.3 Exemple de PDCA – Roue de Deming	43
2.4 Le diagramme de causes et effets	43
3.1 Chaîne causale entre les entraves à la SdF	50
3.2 Relation entre fiabilité, maintenance et disponibilité	51
3.3 démontage d'une batterie lithium	60
3.4 Un technicien vérifier une batterie	61
3.5 exemple de moteur électrique à rotor, celui de la Volkswagen ID.3	62

3.6	instalation de chargement	63
3.7	système de suspension TESLA M3	64
3.8	Multimètre numérique	66
3.9	Pince ampèremétrique	67
3.10	Testeur de continuité CONTITEST 501	67
3.11	Testeur de circuit	68
3.12	Testeur de batterie	68
3.13	OBD2-interface	69
3.14	fluke TSi60	69
3.15	bosch kts 250	70
3.16	lunch C455	71
4.1	l'AMDEC et la re-conception	77
4.2	Histogramme d'AMDEC	85
4.3	Réduction de l'Arbre de défaillance.	85
4.4	Performance calculateur moteur.	86
4.5	Performance moteur électrique.	86
4.6	Performance capteur de pédale d'accélération.	87
4.7	Performance batterie d'attraction.	87
4.8	Performance de système.	88
4.9	Pourcentage d'occurrence de chaque cause de défaillance du moteur électrique d'un EV	93

Liste des symboles

<i>VE</i>	véhicule électrique
<i>C</i>	Criticité
<i>F</i>	Fréquence
<i>/MBR/</i>	maintenance basée sur le risque
<i>AC</i>	courant alternatif
<i>AMDEC</i>	Analyse des Modes de Défaillances et Études des Criticités
<i>APR</i>	Analyse Préliminaire des Risques
<i>COV</i>	composés organiques volatils
<i>D</i>	détection
<i>DC</i>	courant continu
<i>G</i>	Gravité
<i>G</i>	irradiation; (W/m^2)
<i>GES</i>	gaz à effet de serre
<i>IPR</i>	Indice de Priorité de Risque
<i>KPI</i>	clés de performance
<i>Li – ion</i>	Batterie à ions lithium
<i>MAS</i>	moteur asynchrone
<i>MCC</i>	moteur à courant continus
<i>MCI</i>	moteurs à combustion interne
<i>MCO</i>	maintien en conditions opérationnelles
<i>Ni – Cd</i>	batterie nickel-cadmium
<i>NPR</i>	nombre de priorité de risque

<i>PPU</i>	Points de Panne Unique
<i>S</i>	surface du générateur; (m ²)
<i>SDF</i>	surter de fonctionnement
<i>TPM</i>	maintenance productive totale
<i>VEPC</i>	véhicules électriques à pile à combustible
<i>VH</i>	véhicules hybrides
<i>VTE</i>	véhicules tout électriques

Introduction générale

Le grand nombre de voitures circulant actuellement dans le monde est l'une des principales causes de la pollution environnementale et des problèmes liés à l'énergie, tels que la pollution de l'air, le réchauffement climatique et la consommation d'énergie. Les émissions du secteur des transports ont un impact important sur la qualité de l'air et contribuent à la détérioration de la santé humaine et de l'écosystème.

Dans ce contexte, la transition vers des véhicules plus respectueux de l'environnement est devenue une priorité. Les voitures électriques sont considérées comme une solution prometteuse pour réduire les émissions de gaz à effet de serre et atténuer les problèmes liés à la pollution de l'air. Contrairement aux véhicules à combustion interne, les véhicules électriques ne produisent pas d'émissions d'échappement directes, ce qui contribue à améliorer la qualité de l'air et à réduire les risques pour la santé humaine.

Cependant, pour que la transition vers les véhicules électriques soit réussie, il est essentiel de comprendre pleinement les aspects de la maintenance et du diagnostic de ces véhicules. La maintenance joue un rôle crucial dans la durabilité et les performances des véhicules électriques, qui sont composés de systèmes électriques et électroniques complexes. La connaissance des procédures de maintenance appropriées, ainsi que la capacité à diagnostiquer et à réparer les défaillances spécifiques des véhicules électriques, sont des compétences essentielles pour garantir la fiabilité et la disponibilité de ces véhicules.

En étudiant les méthodes de maintenance et de diagnostic des voitures électriques, cette recherche mettra en lumière l'importance de ces processus pour assurer le bon fonctionnement et la durée de vie des véhicules électriques. L'identification précoce des problèmes et leur résolution en temps opportun permettront de réduire les temps d'immobilisation du véhicule, d'améliorer l'efficacité opérationnelle et de réduire les coûts de maintenance. De plus, une meilleure compréhension des pannes et des défaillances spécifiques aux véhicules électriques permettra d'améliorer les procédures de maintenance et de développer des stratégies plus efficaces pour la gestion des flottes de véhicules électriques.

Dans le premier chapitre, nous présentons une introduction aux voitures électriques, en abordant leur évolution historique ainsi qu'un aperçu détaillé des voitures électriques actuelles. Nous examinons les différents types de voitures électriques, ainsi que les composants fondamentaux d'un véhicule électrique et leur fonctionnement, en mettant l'accent sur les sources d'énergie, grâce à une approche scientifique pour comprendre leur fonctionnement et leur interaction.

La deuxième chapitre offre une vue d'ensemble approfondie de la maintenance industrielle, en se concentrant sur les principes et les méthodes utilisés pour assurer un fonctionnement correct et la disponibilité des véhicules électriques.

Le troisième chapitre se concentre sur le diagnostic des défaillances des véhicules électriques, en utilisant des outils et

des techniques avancées pour identifier et résoudre les problèmes techniques. Nous abordons les concepts de sécurité opérationnelle et les défis associés à la maintenance des véhicules électriques, en mettant l'accent sur la prévention des accidents et la gestion des risques. Nous examinons les méthodes d'analyse des défaillances,

Dans le quatrième chapitre, nous mettons en pratique une approche de maintenance approuvée, en appliquant les connaissances acquises pour améliorer les performances et la fiabilité des véhicules électriques. Nous présentons les résultats obtenus à travers des études de cas, des analyses de données et des évaluations des performances, démontrant l'efficacité des méthodes de maintenance utilisées.

Cette thèse vise à approfondir notre compréhension des véhicules électriques, de la maintenance industrielle et du diagnostic des défaillances, en utilisant une approche scientifique rigoureuse et des techniques avancées. En intégrant ces domaines, nous contribuons à une meilleure utilisation des véhicules électriques dans le contexte du développement durable et de l'industrie automobile, en renforçant leur adoption et en maximisant leur efficacité opérationnelle.

Généralités sur les véhicules électriques

1.1 Introduction

Le premier chapitre aborde un large éventail de sujets liés aux voitures électriques. Nous commencerons par un aperçu historique, suivi d'un aperçu de la prévalence actuelle des voitures électriques. Le chapitre abordera également les définitions et explorera les différents types de voitures électriques.

De plus, nous examinerons les composants d'une voiture électrique et leur fonctionnement. Cela inclut la discussion des différentes sources d'énergie telles que les batteries. Nous explorerons également le système de propulsion des voitures électriques, en mettant l'accent sur les moteurs électriques, les convertisseurs de puissance et les systèmes auxiliaires. De plus, nous discuterons des systèmes tels que le système de charge, le système de freinage, les différentes architectures de transmission, les transmissions et les calculs de puissance.

Nous aborderons également l'impact des voitures électriques sur le monde, en mettant en évidence leurs avantages environnementaux et en comparant les émissions avec les voitures à combustion traditionnelles. De plus, nous fournirons un aperçu des avantages et des inconvénients de ces voitures.

1.2 Historique

La voiture électrique n'est pas une idée nouvelle. Au tournant du 19ème siècle, plusieurs modes de propulsion, tels que le moteur électrique, le moteur à vapeur et le moteur thermique, étaient en compétition.

En 1832-1839, l'homme d'affaires écossais Robert Anderson a inventé la première voiture électrique, qui était plutôt une carriole électrique.

Vers 1835, l'américain Thomas Davenport a construit une petite locomotive électrique, et en 1838, l'écossais Robert Davidson a créé un modèle similaire capable de rouler jusqu'à 6 km/h.

En 1859, le français Gaston Planté a inventé la batterie rechargeable au plomb-acide, qui a été améliorée par Camille Faure en 1881.

En 1884, Thomas Parker a conduit la première voiture électrique au monde [1].



Figure 1.1: 1^{er} prototype Voiture électrique, Robert Anderson dans les années 1830

À partir de 1900, la voiture électrique a connu une popularité croissante, avec plus d'un tiers des voitures en circulation étant électriques, le reste étant à essence et à vapeur.

Cependant, dans les années 1920, plusieurs facteurs, tels que la faible autonomie, la vitesse trop basse, le manque de puissance,

la disponibilité du pétrole et le prix deux fois plus élevé que celui des voitures à essence, ont conduit au déclin de la voiture électrique.

En 1972, Victor Wouk, considéré comme le parrain du véhicule hybride, a construit la première voiture hybride, la Buick Skylark de GM.

En 1976, le Congrès américain a adopté « the Electric and Hybrid Vehicle Research, Development and Demonstration Act »,

qui a favorisé le développement des nouvelles technologies de batteries, moteurs et composants hybrides [2].



Figure 1.2: La première voiture hybride.

Dès 1988, la société automobile General Motors a lancé un projet de recherche pour développer une nouvelle voiture électrique qui est devenue l'EV1, produite entre 1996 et 1998. En 1997, Toyota a lancé la Prius, la première voiture hybride à être commercialisée en série.

De nombreux autres modèles électriques hybrides ont également été lancés entre 1997 et 2000, tels que la Honda EV Plus, la G.M. EV1, le Ford Ranger pickup EV, Nissan Altra EV, Chevy S-10 EV et le Toyota RAV4 EV.

Cependant, à partir de 2000, la voiture électrique a de nouveau commencé à perdre en popularité.

En 2004, la fin de l'EV1 a été annoncée, GM récupérant tous les véhicules pour les détruire, malgré plusieurs mouvements de protestation.

Le constructeur a été accusé de céder aux pressions des sociétés pétrolières.

Aujourd'hui, la voiture électrique est devenue une réalité.

Les principaux constructeurs automobiles ont développé des modèles 100% électriques, tels que La Tesla Model S, et les installations de bornes de recharge sont de plus en plus nombreuses.

La voiture électrique est souvent présentée comme « la solution » au problème de la pollution des gaz d'échappement [3].



Figure 1.3: La Tesla Model S

1.3 Aperçu de la prévalence actuelle des voitures électriques

Les ventes de voitures électriques en 2022 ont enregistré un bond significatif, alors que de nombreux pays envisagent d'étendre la fourniture d'incitations pour soutenir les transports propres. Le nombre de véhicules électriques immatriculés dans le monde l'année dernière a dépassé la barrière des 10 millions d'unités, selon un rapport examiné par la plateforme spécialisée dans l'énergie.

Le rapport de la société d'études de marché "SNE Research" indique que le nombre de voitures électriques immatriculées dans le monde a atteint 10,83 millions d'unités en 2022, soit une augmentation de 61,3% par rapport à 2021, qui a enregistré 6,71 millions d'unités. [4]

Comme cela a attiré l'attention de nombreux secteurs, nous présenterons une statistique qui inclut les constructeurs de voitures électriques les plus célèbres au monde Et le pourcentage des ventes

note :

La statistique inclut les véhicules électriques à batterie uniquement, les véhicules électriques hybrides rechargeables

-Le "BYD" chinois est en tête de liste des ventes de voitures électriques en 2022, avec 1,87 million d'unités vendues, soit une augmentation de 204,6% par rapport à l'année précédente.

-Tesla arrive en deuxième position avec des chiffres de vente de 1,31 million d'unités, soit une augmentation de 40% par rapport à 2021 Alors que SAIC Motor a enregistré des ventes de 978 mille unités, soit une augmentation de 43,1%.

-Volkswagen (815 mille unités) et "Geely Automotive" (646 mille unités) ont pris respectivement les quatrième et cinquième places.

-À la sixième place, Hyundai Motors, dont les ventes ont enregistré 510 000 unités de voitures électriques, ce qui comprend les voitures "Hyundai" et "Kia", soit une augmentation de 40,9% par rapport à 2021 [5].

1.4 Définition

Une voiture électrique, également connue sous le nom de véhicule électrique (VE), est un type de véhicule qui fonctionne à l'électricité stockée dans des batteries rechargeables plutôt qu'à l'essence ou au diesel. Contrairement aux voitures traditionnelles à essence, les voitures électriques utilisent un moteur électrique pour alimenter les roues, qui est alimenté en électricité par les batteries.

Cela signifie que les voitures électriques ne produisent pas d'émissions de combustion de carburant, ce qui en fait une option plus respectueuse de l'environnement.

Ils ont également des coûts d'exploitation plus faibles que les voitures traditionnelles en raison du coût inférieur de l'électricité par rapport à l'essence ou au diesel.

Avec l'avancement de la technologie, la portée et les performances des voitures électriques ont également augmenté, les rendant plus pratiques et viables pour une utilisation quotidienne [6]

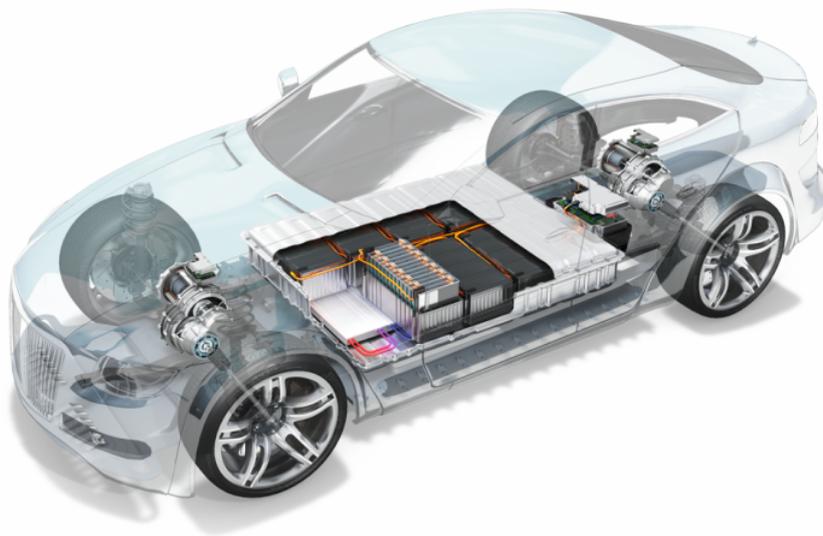


Figure 1.4: Voiture électrique

1.5 Différentes types de voitures électriques

Grâce aux avancées scientifiques et technologiques dans le domaine de l'électronique de puissance, de nombreuses idées et nouvelles conceptions de véhicules électriques (VE) sont en cours de développement pour améliorer leur mode de propulsion.

La production, le stockage et l'utilisation de l'électricité sont les problématiques communes à toutes ces explorations.

Les VE font partie de la famille des véhicules électrifiés, qui englobe les véhicules hybrides, les hybrides rechargeables et les véhicules entièrement électriques.

À l'intérieur de ces catégories, plusieurs sous-catégories peuvent exister . [7]

1.5.1 Véhicules tout électrique (VTE) :

Les véhicules tout électriques (VTE) sont alimentés uniquement par une batterie rechargeable, ce qui les rend particulièrement adaptés aux petits véhicules urbains et contribue à réduire la pollution gazeuse et sonore dans les zones urbaines.

Toutefois, le développement de ce type de véhicule est étroitement lié à l'amélioration de leur alimentation en énergie, car les batteries ont une énergie massique relativement faible, sont très lourdes et coûteuses.

Il existe deux types de VTE selon la source d'énergie utilisée : les voitures électriques à batterie rechargeable via une prise de courant et les voitures électriques alimentées par une pile à combustible [8]

1.5.2 Véhicules électriques à batterie rechargeable par prise de courant

constituent actuellement la majeure partie des véhicules électriques dans le monde.

Les batteries sont des systèmes embarqués qui stockent de l'énergie électrique pour une utilisation ultérieure.

Elles sont considérées comme le système le mieux adapté pour l'alimentation des véhicules électriques, et ont été inventées au 19ème siècle, ce qui en fait le système de stockage le plus maîtrisé techniquement

Les véhicules électriques à batterie rechargeable par prise de courant constituent actuellement la majeure partie des véhicules électriques dans le monde.

Les batteries sont des systèmes embarqués qui stockent de l'énergie électrique pour une utilisation ultérieure.

Elles sont considérées comme le système le mieux adapté pour l'alimentation des véhicules électriques, et ont été inventées au 19ème siècle, ce qui en fait le système de stockage le plus maîtrisé techniquement.

1.5.3 Véhicules électriques à alimentation par pile à combustible :

Les véhicules électriques à pile à combustible (VEPC) produisent leur propre électricité à bord grâce à la pile à combustible, un dispositif électrochimique similaire à une batterie.

Contrairement à une batterie, la pile à combustible produit de l'électricité par réaction chimique tant qu'elle est alimentée en carburant, plutôt que de stocker et de relâcher de l'énergie électrique.

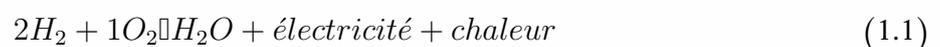
Il existe différents types de piles à combustible qui fonctionnent avec différents carburants, mais la pile à membrane échangeuse de protons est considérée comme la plus prometteuse pour les véhicules automobiles, utilisant de l'hydrogène H₂ et de l'oxygène de l'air ambiant comme carburant.

Bien que cette technologie soit assez récente dans le domaine automobile et encore expérimentale, la pile à combustible existe depuis près de deux cents ans,

inventée en Angleterre au début du 19ème siècle par Sir Henry Davy et Sir William Grove [9] .

Son principe de fonctionnement repose sur la réaction entre l'hydrogène et l'oxygène pour produire de l'électricité, de l'eau et de la chaleur,

selon l'équation suivante :



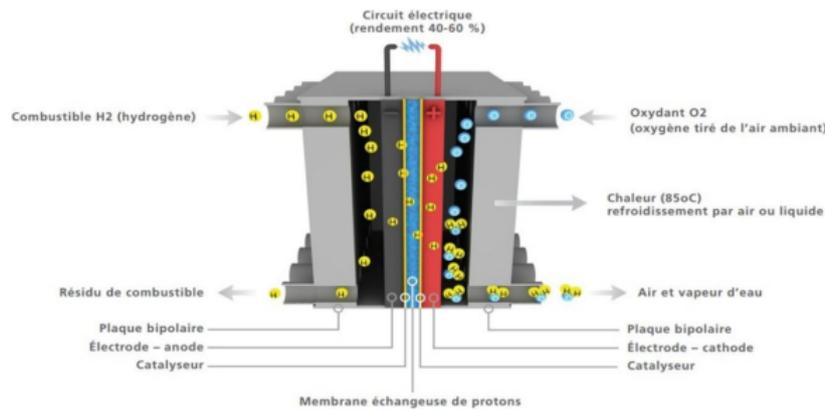


Figure 1.5: Principe de fonctionnement de la pile à combustible

1.5.4 Véhicules hybrides :

Les véhicules hybrides sont équipés d'au moins deux sources d'énergie différentes pour leur production et leur stockage d'énergie,

généralement un moteur thermique traditionnel (essence ou diesel) ainsi qu'au moins un moteur électrique et un stockage d'énergie par batterie.

Ces systèmes peuvent fonctionner de manière simultanée ou indépendante les uns des autres.

Les VH ont un moteur classique et un moteur électrique qui travaillent ensemble en fonction de la vitesse et de l'accélération du véhicule.

Le moteur électrique améliore les performances du moteur thermique et l'autonomie du véhicule.

Il existe deux principaux types de systèmes de propulsion hybrides : parallèle et série, qui diffèrent dans leur façon d'intégrer le fonctionnement des deux unités de production d'énergie. [10]

1.5.5 Véhicules hybrides série :

Les véhicules hybrides série utilisent un principe de fonctionnement où le moteur électrique est alimenté par un alternateur entraîné par un moteur thermique tournant à une vitesse constante.

Les deux moteurs sont connectés en série, d'où le nom du système.

En ajustant la vitesse de rotation du moteur thermique pour obtenir un rendement maximal, la quantité de carburant brûlé par cycle moteur peut être augmentée, ce qui réduit les émissions polluantes.

En outre, la signature sonore du moteur thermique peut être améliorée pour la vitesse de rotation choisie. La figure présente le schéma de principe de ce type de véhicule [11].

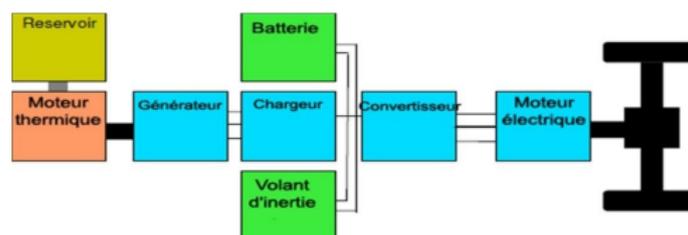


Figure 1.6: Véhicule hybride série

Dans les véhicules hybrides série, la génératrice fournit la plupart de l'énergie électrique nécessaire au fonctionnement du moteur électrique,

tandis que la batterie ne sert que de tampon pour fournir des pointes d'énergie ou pour fonctionner en mode tout électrique.

Bien que cette architecture présente un faible rendement global en raison de la conversion de la puissance mécanique en puissance électrique,

puis en puissance mécanique à nouveau, elle offre deux degrés de liberté en termes de régime et de couple du moteur thermique,

qui peuvent être choisis indépendamment des conditions de conduite [12].

1.5.6 Véhicule hybride parallèle :

Le VHP est une solution hybride qui permet d'utiliser deux moteurs en parallèle : un moteur électrique et un moteur thermique.

Cette architecture permet de bénéficier des avantages de chaque type de moteur, en fonction des conditions de conduite.

Par exemple, en ville, le moteur électrique peut être utilisé en mode tout électrique pour réduire les émissions polluantes.

Pour les grands déplacements, le moteur thermique peut être utilisé pour fournir une autonomie plus importante

. En outre, le moteur électrique peut également jouer le rôle d'un générateur, entraîné par le moteur thermique, pour recharger les batteries lorsque la puissance électrique n'est pas requise pour la propulsion du véhicule [13].

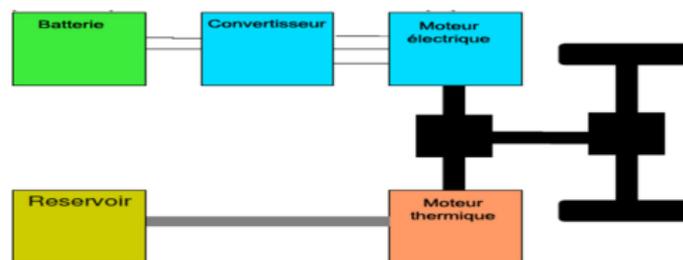


Figure 1.7: – Véhicule hybride parallèle

1.5.7 Véhicule hybride combiné

Les hybrides combinés sont des véhicules qui intègrent à la fois un moteur électrique, une génératrice et un moteur thermique.

Cette architecture, également appelée hybride parallèle à dérivation de puissance, permet une gestion efficace des puissances demandées et fournies, ce qui permet de contrôler en régime le moteur thermique et de partager son couple entre les demandes du véhicule et la recharge de la batterie. Pour mieux comprendre le fonctionnement de l'hybride combiné, il est possible de le schématiser de manière suivante [14].

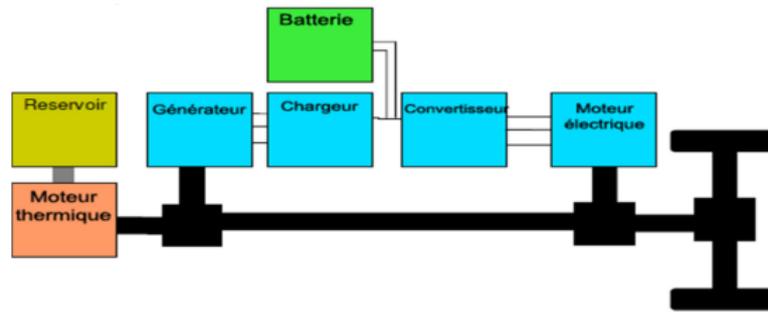


Figure 1.8: – Véhicule hybride combiné

1.6 Composants d'un véhicule électrique et son fonctionnement:

Les voitures électriques représentent une transformation radicale dans l'industrie automobile, et cela est dû à la technologie présente dans leurs composants. Les voitures électriques fonctionnent grâce à une source d'énergie bien connue, l'électricité, et utilisent de nombreux composants avancés et importants. Nous allons maintenant découvrir les composants les plus importants [15].



Figure 1.9: Voiture électrique démontée

1.6.1 Les sources d'énergie :

1.6.1.1 la batterie

Les batteries jouent un rôle essentiel dans le stockage de l'énergie électrique au sein d'un système. Elles utilisent une solution chimique capable de fournir des électrons, permettant ainsi le transfert et le stockage de l'énergie. Les batteries au plomb étaient couramment utilisées dans les années 90, mais elles présentaient des inconvénients tels qu'une autonomie limitée et un encombrement important.

Cependant, les progrès technologiques ont conduit à l'utilisation croissante des batteries au lithium, qui offrent une efficacité accrue tout en conservant le même principe de fonctionnement.

Le processus de charge et de décharge des batteries au lithium est relativement simple. Lorsqu'une batterie est déchargée, les électrons sont soutirés de la borne négative, créant ainsi un déséquilibre avec la borne positive. Lorsque la batterie est rechargée, des électrons sont réinjectés dans la borne négative, rétablissant l'équilibre chimique et permettant à nouveau le transfert d'énergie entre les bornes négative et positive [16].

Les batteries au lithium sont constituées de milliers de cellules, généralement assemblées sous forme de petites piles ou de poches.

La quantité d'énergie stockée dans une batterie est exprimée en kilowattheures (kWh), tandis que le débit d'électricité délivré est mesuré en kilowatts (kW). Par exemple, une batterie de 50 kWh rechargeant à une puissance de 10 kW peut se recharger en environ 5 heures. Cependant, au-delà de 80% de charge, les batteries réduisent automatiquement la vitesse de recharge pour des raisons de sécurité et de préservation de

la durée de vie.

Une fois le courant stocké dans la batterie, il est dirigé vers un ou plusieurs moteurs électriques.

Il convient de noter que les batteries rencontrent encore des défis, tels que leur durée de vie limitée et le temps de charge prolongé. Des recherches et des développements continus sont nécessaires pour améliorer ces aspects et rendre les batteries plus performantes et durables.

, les batteries constituent un élément clé du stockage de l'énergie électrique, et leur utilisation dans les véhicules électriques présente des avantages significatifs en termes de réduction des émissions et de dépendance aux combustibles fossiles [17].



Figure 1.10: batterie de traction d'un véhicules électrique

1.6.1.2 Différentes Types de batteries :

1-Batteries nickel-métal hydrure

Les batteries nickel-métal hydrure (Ni-MH) sont présentes dans certains véhicules hybrides actuels ainsi que dans des appareils grand public tels que les rasoirs, les brosses à dents électriques, les appareils

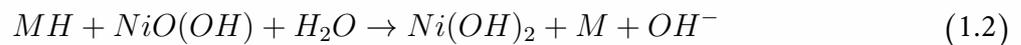
photo et les caméscopes. Comparées aux batteries au plomb, elles offrent une densité d'énergie deux fois supérieure, mais leur densité de puissance est inférieure, ce qui les rend plus encombrantes. Les batteries Ni-MH ont tendance à s'autodécharger plus rapidement lorsqu'elles ne sont pas utilisées. Bien qu'elles puissent fournir des impulsions de puissance rapides, les décharges rapides à forte charge et répétées ont un impact négatif sur leur durée de vie [18].

En raison de leurs caractéristiques, les batteries Ni-MH sont mieux adaptées aux véhicules hybrides, qui requièrent une demande moins exigeante en termes de décharge rapide, par rapport aux véhicules électriques à batterie. Les véhicules hybrides utilisent généralement une combinaison de moteurs électriques et de moteurs à combustion interne, ce qui leur permet de tirer parti des avantages spécifiques des batteries Ni-MH, tels que leur capacité à fournir des poussées de puissance rapides.

Il convient de noter que les batteries Ni-MH ont un coût raisonnable et sont moins coûteuses que les batteries nickel-cadmium. Elles sont donc largement utilisées dans les appareils grand public où une densité d'énergie élevée n'est pas primordiale. Cependant, dans le contexte des véhicules électriques à batterie, où des performances plus élevées en termes de décharge rapide et de densité d'énergie sont nécessaires pour une autonomie étendue, les batteries lithium-ion sont généralement préférées.

les batteries nickel-métal hydrure ($Ni - MH$) dépendent d'une réaction chimique qui se produit entre l'hydrogène métallique et l'oxyde de nickel en présence d'un électrolyte. Le courant électrique dans la batterie est généré par la réaction entre le nickel négatif (-) dans la cathode et les ions positifs (+) d'hydrogène métallique dans l'anode. Des électrons sont libérés lors de cette réaction et le courant électrique circule dans le circuit externe [19].

L'équation chimique pour cette réaction est:



(MH) est un alliage d'hydrure de métal dans l'anode et ($NiO(OH)$) est l'oxyde de nickel dans la cathode.

L'oxyde est converti en hydroxyde de nickel ($Ni(OH)_2$) dans la cathode, tandis que l'hydrogène métallique (MH) dans l'anode est converti en métal (M) et des ions hydroxyde (OH^-)

. Un électrolyte contenant de l'hydroxyde de potassium (KOH) est utilisé, généralement avec une densité plus faible que l'électrolyte utilisé dans les batteries nickel-cadmium [20].

2-Batteries au lithium-ion (Li-ion)

Ces batteries sont largement utilisées dans les voitures électriques car elles sont légères et ont une densité d'énergie élevée. Elles peuvent être rapidement chargées et déchargées en toute sécurité

Lors de la charge de la batterie, un courant électrique traverse l'anode et la cathode, les électrons sont libérés des atomes de lithium à l'anode et transférés à la cathode via le circuit externe, tandis que les ions lithium sont libérés à l'anode et se déplacent à travers l'électrolyte jusqu'à la cathode. Et lorsque la batterie est déchargée, l'inverse se produit, les ions lithium se déplacent de la cathode vers l'anode, tandis que le courant électrique circule dans la direction opposée pour charger la batterie [21].

.L'équation chimique de la réaction est la suivante :



Où :

($LiCoO_2$) : Le composé d'oxyde de cobalt qui forme la cathode.

(C_6) : Le graphite (carbone) utilisé dans l'anode.

$(LiPF_6)$: Le sel de lithium utilisé comme solvant d'électrolyte.

(Li_2C_6) : Le composé de lithium formé dans l'anode pendant la réaction.

(Co) : Le cobalt qui est produit dans la cathode pendant la réaction.

(PF_6^-) : L'ion hexafluorophosphate qui est produit dans l'électrolyte pendant la réaction.

Ces batteries ont une durée de vie longue [22].



Figure 1.11: Batteries lithium-ion

3-Batteries au lithium polymère (Li-poly)

Les batteries au lithium polymère partagent de nombreuses similitudes avec les batteries au lithium-ion (Li-ion), à l'exception de l'utilisation d'un électrolyte solide en plastique (polymère) et de la possibilité d'avoir des cellules non cylindriques. Cette caractéristique leur permet d'être façonnées pour s'adapter à des espaces spécifiques, ce qui améliore l'utilisation de l'espace disponible. Les autres propriétés des batteries Li-Poly sont similaires à celles des batteries Li-ion. Ces batteries sont déjà utilisées dans certains véhicules hybrides.

Les batteries lithium-polymère ($Li - Poly$) sont basées sur une réaction chimique qui se produit entre une cathode en oxyde de cobalt et une anode en graphite en présence d'un électrolyte organique. Le courant électrique dans la batterie est généré par la réaction des ions lithium positifs (+) dans la cathode avec les électrons libres dans l'anode. Les électrons sont libérés au cours de cette réaction et le courant électrique circule à travers le circuit extérieur [23].

L'équation chimique de cette réaction est:



(CoO_2) est l'oxyde de cobalt dans la cathode et (C_6) est le graphite dans l'anode.

L'oxyde de cobalt (CoO_2) dans la cathode est converti en $(LiCoO_2)$, tandis que les électrons sont libérés dans le graphite (C_6) de l'anode.

L'électrolyte organique contient des sels de lithium pour transporter les ions entre la cathode et l'anode [24].

4-Batteries au plomb

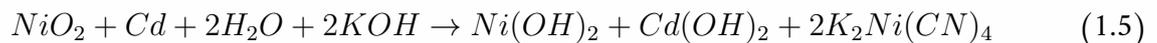
On utilise les batteries au plomb dans les voitures et camions conventionnels pour le démarrage, l'éclairage et les autres accessoires électriques. Elles sont relativement peu coûteuses et leur densité de puissance est élevée, mais leur densité d'énergie est plutôt faible [25].

5-Batteries nickel-cadmium

Ces batteries étaient courantes dans le passé, mais leur utilisation est devenue moins courante en raison de leur poids élevé et de leur faible densité d'énergie. Cependant, elles sont toujours utilisées dans certaines voitures électriques anciennes et dans des applications industrielles.

Les batteries nickel-cadmium ((Ni – Cd)) sont basées sur une réaction chimique entre le nickel et le cadmium en présence d'un électrolyte contenant de l'hydroxyde de potassium. Le courant électrique est généré dans la batterie par la réaction du nickel négatif (-) dans la cathode avec les ions positifs (+) du cadmium dans l'anode. Des électrons sont émis lors de cette réaction et le courant électrique circule à travers le circuit externe [26].

L'équation chimique de cette réaction est:



L'oxyde de nickel (NiO_2) dans la cathode est converti en hydroxyde de nickel ($Ni(OH)_2$) et le cadmium Cd dans l'anode est converti en hydroxyde de cadmium ($Cd(OH)_2$). Le composé organique ($K_2Ni(CN)_4$) est utilisé comme solvant pour l'électrolyte [27].

Le tableau suivante donne une comparaison des différents technologies des batteries

Batterie	Densité énergétique (Wh/kg)	Nombre de cycles (charge/décharge)	Temps de charge	Température de fonctionnement
Plomb acide	30-50	500 à 800	6 à 12h	-20 à 60(C)
Ni-Cd	45-80	1000 à 2000	1 à 2h	-40 à 60(C)
Ni-Mh	60-120	600 à 1500	2 à 4h	20 à 60(C)
Li-ion	160-200	400 à 1200	2 à 4h	-20 à 60(C)

Table 1.1: Tableau comparatif des technologies des batteries

Selon le tableau et les statistiques récentes, on peut conclure que les batteries au lithium sont les meilleures.

Les statistiques indiquent également que les batteries à ions lithium (Li-ion) sont les plus courantes dans les voitures électriques.

Ces batteries sont légères et ont une densité d'énergie élevée, ce qui les rend idéales pour une utilisation dans les voitures électriques.

De plus, elles ont une durée de vie plus longue et des performances supérieures par rapport aux autres batteries. Aujourd'hui, les batteries à ions lithium représentent environ 90 % du marché des batteries de voitures électriques dans le monde.

Selon un rapport publié par l'Agence internationale des énergies renouvelables (IRENA) en 2021 [28].

1.6.1.3 Super condensateurs

Les super-condensateurs sont des dispositifs de stockage d'énergie électrique qui fonctionnent en stockant l'énergie sous forme électrostatique. Leur principe de fonctionnement repose sur la formation d'une double couche électrochimique à l'interface d'un électrolyte et d'une électrode de grande surface

spécifique. Lorsqu'une différence de potentiel est appliquée, des charges ioniques sont stockées aux interfaces électrode-électrolyte, agissant comme deux condensateurs en série [29].

Les super-condensateurs se distinguent par leur puissance spécifique élevée, pouvant être jusqu'à 10 fois supérieure à celle des batteries au plomb, . Cependant, leur énergie spécifique est généralement 10 à 20 fois plus faible que celle des accumulateurs. Les batteries les plus couramment utilisées dans les véhicules électriques sont basées sur des accumulateurs tels que les batteries au plomb, les accumulateurs nickel/cadmium et les batteries lithium-ion [30].

L'utilisation de super-condensateurs dans les véhicules électriques répond à plusieurs besoins spécifiques. Ils peuvent être utilisés pour le démarrage et les contraintes à basse température, l'assistance à l'accélération et la récupération d'énergie, ainsi que l'alimentation des organes auxiliaires. En intégrant des super-condensateurs, la batterie principale peut fonctionner à son régime nominal de fonctionnement, ce qui peut prolonger sa durée de vie.

L'utilisation croissante des super-condensateurs dans le secteur automobile fait l'objet de nombreuses recherches et permet d'explorer de nouvelles possibilités pour améliorer les performances et l'efficacité des véhicules électriques.

Le super condensateur se compose de deux collecteurs métalliques (Figure 12), chacun couplés à deux électrodes carbonées, poreuses et imprégnées d'électrolyte.

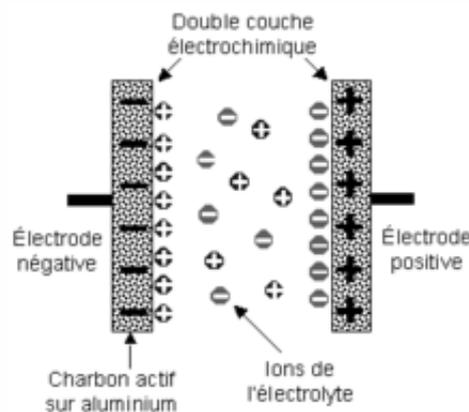


Figure 1.12: Composition d'un super condensateur

1.6.1.4 Accumulateur :

Les accumulateurs sont des dispositifs de stockage d'énergie qui fonctionnent en convertissant l'énergie chimique en énergie électrique. Ils sont composés de deux couples électrochimiques, chacun comportant deux électrodes immergées dans un électrolyte. Lorsque des réactions d'oxydation ou de réduction se produisent, échangeant des électrons, les ions générés se déplacent à travers l'électrolyte. Pour obtenir une grande capacité de stockage d'énergie, il est nécessaire d'avoir un grand nombre d'électrons échangés, des réactions impliquant des éléments hautement oxydants et réducteurs, ainsi qu'une réversibilité parfaite des processus électrochimiques et des matériaux de faible masse ou volume molaire [31].

1.6.2 Système de propulsion électrique

Le système de propulsion électrique comprend un ou plusieurs moteurs électriques dont la puissance totale peut varier de 15 kW à plus de 400 kW, en fonction de la taille du véhicule, de son utilisation et des performances recherchées. Par exemple, pour une petite véhicule 4 places, la puissance du moteur peut être de 48 kW (65 CV). Le système de propulsion comprend également des convertisseurs de puissance et leurs commandes [32].

1.6.2.1 Moteur électrique :

Le moteur électrique est un composant fondamental et relativement simple au sein des véhicules électriques. Son fonctionnement repose sur les interactions entre un électroaimant et un aimant permanent, permettant ainsi de convertir l'énergie électrique en énergie mécanique. Cette transformation de l'énergie est essentielle pour propulser le véhicule pendant les phases de traction.

Par ailleurs, le moteur électrique peut également fonctionner en sens inverse lors des phases de freinage, en convertissant l'énergie mécanique en énergie électrique. Cette capacité de régénération d'énergie permet de récupérer une partie de l'énergie dissipée pendant le freinage et de la renvoyer vers la source principale d'alimentation, telle que la batterie. Ainsi, pendant le freinage, la chaîne mécanique joue un rôle actif en tant que source de puissance, tandis que la batterie assume le rôle de récepteur énergétique [33].

Le moteur électrique présente de nombreux avantages, notamment sa fiabilité, sa simplicité de conception et son rendement élevé. Il est largement utilisé dans les véhicules électriques en raison de ces caractéristiques favorables. En tant qu'actionneur, le moteur électrique génère un mouvement de rotation à partir de l'énergie électrique, assurant ainsi la propulsion du véhicule. Son architecture comprend un axe de sortie, un corps bâti et deux broches électriques, permettant ainsi un fonctionnement efficace et fiable du moteur.

En résumé, le moteur électrique représente un élément essentiel au sein des voitures électriques, offrant une conversion d'énergie efficace et une propulsion fiable. Son utilisation permet de maximiser l'efficacité énergétique du véhicule et de faciliter la récupération d'énergie lors des phases de freinage, contribuant ainsi à l'amélioration globale des performances et de l'autonomie des véhicules électriques [34].

Il existe un grand nombre de type de moteurs :

Moteurs à courant continu Le moteur à courant continu (MCC) La source d'énergie provenant de la batterie étant à courant continu, la choix d'un moteur à courant continu semble un choix évident. Historiquement, les entraînements utilisant des moteurs à courant continu ont été employés bien en avant dans les véhicules électriques parce qu'ils offrent un contrôle de vitesse simple. De plus, ce type de moteur dispose d'excellentes caractéristiques pour la propulsion électrique (courbe du couple très favorable à faible vitesse). En revanche, leur fabrication est onéreuse et nécessite l'entretien du système balais-collecteur. Leur vitesse est limitée et ayant une faible puissance massique avoisinant en générale, les 0,3 à 0,5 kW/kg, alors que celle des moteurs à essence est de l'ordre 0,75 à 1,1 kW/kg. Ce qui les rend moins fiables et non appropriés dans ce domaine d'application [32]

Moteurs asynchrones Le moteur asynchrone (MAS) Le moteur asynchrone est formé d'un stator et d'un rotor :

- Stator : la partie fixe du moteur. Il comporte trois bobinages (ou enroulements) qui peuvent être couplés en étoile (Y) ou en triangle selon le réseau d'alimentation.

- Rotor : la partie tournante du moteur. Cylindrique, il porte soit un bobinage (d'ordinaire triphasé comme le stator) accessible par trois bagues et trois balais, soit une cage d'écurie non accessible, à base de barres conductrices en aluminium [35].

Dans les deux cas, le circuit rotorique est mis en court-circuit (par des anneaux ou un rhéostat). La machine asynchrone, du part sa simplicité de fabrication et d'entretien est actuellement la machine la plus répandue dans le secteur industriel et présente de bien meilleures performances que les autres types de machines. Par ailleurs, ces machines possèdent un couple massique, un rendement et un facteur de puissance plus faible que les machines à aimants [36].

Moteurs synchrones Le moteur synchrone Bien que plus délicats à piloter, plus coûteux et potentiellement moins robuste, le choix du moteur synchrone s'est imposé dans les véhicules électriques et hybrides.

La machine synchrone offre le meilleur rendement en mode générateur et moteur. Le moteur synchrone se compose, comme le moteur asynchrone, d'un stator et d'un rotor séparés par un entrefer. La seule différence se situe au niveau de la conception du rotor [37].

1.6.2.2 Fonctionnement du moteur électrique

Les voitures électriques faisant partie de plus en plus de notre quotidien, il était donc temps de se pencher sur le fonctionnement de leur moteur ainsi que des différentes déclinaisons (synchrone, asynchrone, permanent, à induction etc.). Voyons donc le principe général de cette technologie qui pourtant ne date pas d'hier [38].

Le principe d'un moteur électrique Le principe d'un moteur électrique, quelque soit sa conception, est d'exploiter la force magnétique pour obtenir un mouvement.

La force magnétique nous est un peu familière grâce aux aimants qui peuvent repousser ou attirer d'autres aimants.

Pour cela, on va s'aider de deux éléments principaux : des aimants permanents et des bobines de cuivre (matériaux parfait pour cet emploi car c'est le plus conducteur qui soit ...), ou même que des bobines de cuivre dans certains cas (sans aimant permanent donc) [?].

On va monter le tout sur un axe circulaire pour obtenir un mouvement permanent et linéaire, le but est d'avoir quelque chose qui a un cycle qui se répète à tant qu'on alimente le moteur

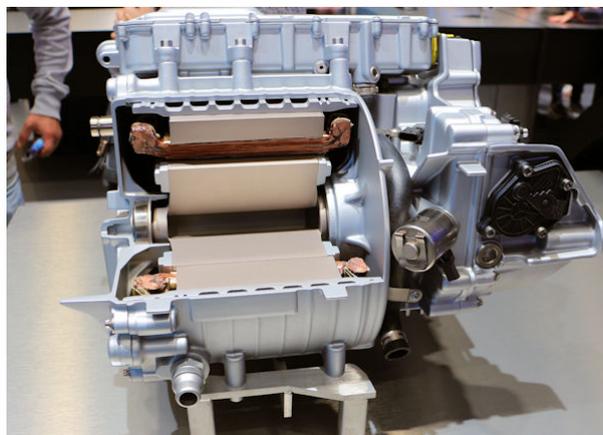


Figure 1.13: moteur

Il faut aussi savoir qu'une bobine traversée par du courant (des électrons donc) se comporte alors comme un aimant, avec un champ électromagnétique avec deux pôles : nord et sud / + et -. Le résultat est que si je fais passer du courant dans la bobine, cette dernière va générer un champ magnétique qui va alors influencer sur celui de l'aimant, qui va alors bouger. Le principe est donc simple, si j'alimente ma bobine j'obtiens une force de rotation par le biais de l'aimant, et si j'arrête de l'alimenter je n'ai plus de force (voici le principe général et simplifié de l'accélérateur d'une voiture électrique, qui sera géré par une électronique de puissance qui va alors s'occuper d'alimenter les moteurs : tension, intensité, alternatif ou continu (selon technologie moteur) etc. Tout moteur électrique est réversible : si on bouge l'aimant manuellement cela génère un courant électrique dans la bobine (on peut alors recharger la batterie par exemple, c'est la régénération). Si on injecte du courant dans la bobine, alors l'aimant se met à bouger [39]

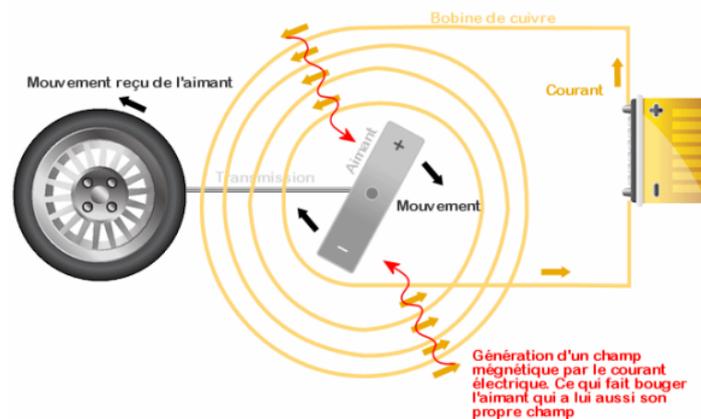


Figure 1.14: principe de base d'un moteur électrique

Attention, en réalité le courant va du - vers le + . Si la convention il a été décidé qu'il irait du + vers le - (on a décidé de cette convention avant des avoir quel était le vrai sens du courant)

Les pièces d'un moteur électrique Accumulateur :

L'accumulateur est la source d'où provient le courant électrique qui alimente généralement le moteur. Il est couramment constitué d'une batterie au lithium-ion ou d'une batterie NiMH. [40]

Stator :

Le stator est la partie fixe du moteur électrique, celle qui ne tourne pas. On peut se rappeler facilement qu'il est statique. Dans la plupart des cas, il est composé de bobines qui sont alimentées et parfois inversées (dans le cas des moteurs à courant alternatif) pour générer un champ magnétique qui fait tourner le rotor [41].

Rotor :

Le rotor est la partie mobile du moteur électrique. On peut se souvenir de son rôle en associant le mot "rotation" au rotor. En général, le rotor n'est pas alimenté en courant électrique car cela est difficile à réaliser de manière durable dans le temps [42].

En résumé, l'accumulateur fournit le courant électrique pour alimenter le moteur, tandis que le stator et le rotor constituent les composants essentiels du moteur électrique. Le stator, en étant alimenté

en courant, crée un champ magnétique qui fait tourner le rotor, assurant ainsi le mouvement et la rotation du moteur.

1.6.2.3 Convertisseur de puissance

Le convertisseur de puissance est un élément essentiel dans les véhicules électriques, utilisé pour contrôler et alimenter le moteur électrique en fonction des limites de tension et de courant acceptables. Il existe une variété de structures possibles pour les convertisseurs de puissance dans les véhicules électriques.

Dans ces applications, la structure du convertisseur se divise en deux parties distinctes : le côté courant continu (DC) et le côté courant alternatif (AC). Ainsi, des convertisseurs DC/DC, des convertisseurs DC/AC ou des convertisseurs AC/DC peuvent être utilisés en fonction des besoins [43].

Ces convertisseurs sont connectés via un bus continu qui assure la distribution de l'énergie électrique dans le véhicule.

Les composants clés des convertisseurs de puissance sont les semi-conducteurs

Les semi-conducteurs de puissance actuels peuvent être classés en trois catégories principales :

les diodes, qui peuvent être ouvertes ou fermées selon le circuit de puissance, les thyristors, qui sont fermés par un signal de commande mais doivent être ouverts par le circuit de puissance, et les transistors, qui sont des interrupteurs commandables pouvant être ouverts et fermés par un signal de commande [44].

Ces semi-conducteurs permettent de contrôler le flux d'énergie électrique et de réguler la tension et le courant qui alimentent le moteur électrique. Ils jouent un rôle crucial dans la conversion de l'énergie électrique en mouvement mécanique, en fournissant une commutation rapide et précise entre les différentes phases du courant électrique.

En résumé, les convertisseurs de puissance dans les véhicules électriques utilisent des semi-conducteurs pour convertir et contrôler l'énergie électrique fournie par la batterie, afin d'alimenter le moteur électrique.

Ces convertisseurs permettent une régulation précise de la tension et du courant, assurant ainsi un fonctionnement optimal du moteur et une gestion efficace de l'énergie dans le véhicule électrique [45].

1.6.2.4 Commande des convertisseurs de puissances

La commande des convertisseurs de puissance est essentielle pour assurer le bon fonctionnement des systèmes d'électronique de puissance. Elle permet de réguler les grandeurs au niveau de la charge et de limiter les valeurs internes afin d'éviter toute surcharge sur la charge elle-même et sur le convertisseur statique [46].

Les circuits de réglage sont complexes et nécessitent des signaux provenant des organes de mesure. Ces signaux sont utilisés pour ajuster les paramètres de fonctionnement du convertisseur de puissance, tels que la tension, le courant et la fréquence, afin de garantir des performances optimales.

De plus, des dispositifs de commande sont nécessaires pour commander le convertisseur de puissance. Ces dispositifs de commande sont responsables de la génération des signaux de commande qui régulent le fonctionnement du convertisseur en fonction des besoins du système. Ils fournissent des références à suivre en termes de couple ou de vitesse, en fonction des exigences du conducteur et des objectifs de la mission.

En résumé, le système de contrôle-commande joue un rôle crucial dans la gestion de tous les composants qui constituent le système de propulsion électrique.

Il fournit des signaux de commande et des références pour réguler et contrôler le convertisseur de puissance, assurant ainsi le bon fonctionnement et la performance optimale du système [47].

1.6.2.5 Auxiliaire

La commande des convertisseurs de puissance est essentielle pour assurer le bon fonctionnement des systèmes d'électronique de puissance. Elle permet de réguler les grandeurs au niveau de la charge et de limiter les valeurs internes afin d'éviter toute surcharge sur la charge elle-même et sur le convertisseur statique.

Les circuits de réglage sont complexes et nécessitent des signaux provenant des organes de mesure. Ces signaux sont utilisés pour ajuster les paramètres de fonctionnement du convertisseur de puissance, tels que la tension, le courant et la fréquence, afin de garantir des performances optimales [48].

De plus, des dispositifs de commande sont nécessaires pour commander le convertisseur de puissance. Ces dispositifs de commande sont responsables de la génération des signaux de commande qui régulent le fonctionnement du convertisseur en fonction des besoins du système. Ils fournissent des références à suivre en termes de couple ou de vitesse, en fonction des exigences du conducteur et des objectifs de la mission.

En résumé, le système de contrôle-commande joue un rôle crucial dans la gestion de tous les composants qui constituent le système de propulsion électrique. Il fournit des signaux de commande et des références pour réguler et contrôler le convertisseur de puissance, assurant ainsi le bon fonctionnement et la performance optimale du système [49].

Dans le tableau suivant, nous listons la consommation des auxiliaires répertoriés dans la majorité des véhicules électriques

Ordres de grandeur De puissances électriques	Puissance (W)
Phares et éclairage additionnel	250
Feux de brouillard avant	110
Feux de brouillard arrière	30
Radio, système audio	15-100
Vitre arrière dégivrante	150
Chauffage de siège	150
Essuie-glace avant	50
Chauffage	5000

Table 1.2: Puissances consommées par les auxiliaires des véhicules conventionnel.

Les auxiliaires ne consomment pas toujours de façon simultanée leurs puissances maximales.

Par exemple la consommation du chauffage est modifiable en fonction de la température extérieure.

1.6.3 Systeme de chargement

le système de chargement dans les véhicules électriques joue un rôle essentiel pour assurer leur fonctionnement et leur autonomie.

Il offre différents types de chargement, utilise divers types de chargeurs et peut être alimenté par différentes sources d'énergie, contribuant ainsi à la croissance de la mobilité électrique et à la réduction

de l’empreinte carbone des transports Le système de chargement se compose de différents composants et processus qui assurent le transfert de l’énergie électrique vers la batterie du véhicule [50].

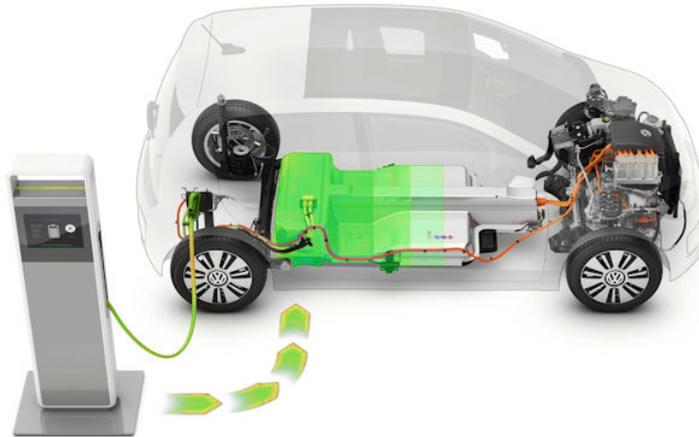


Figure 1.15: voiture électrique en charge

1.6.3.1 Chargeurs

Le chargeur convertit l’électricité provenant de la source d’alimentation externe en un courant compatible avec la batterie du véhicule.

Le processus de charge commence par la connexion du câble de charge entre le chargeur embarqué du véhicule et la source d’alimentation externe.

Une fois la connexion établie, le chargeur régule le courant et la tension de charge pour s’adapter aux besoins de la batterie [51].



Figure 1.16: câble de chargement Tesla S

Il existe deux types principaux de chargeurs pour cette fonction :

a) Les chargeurs de type "lent":

Ces chargeurs ont une puissance moyenne d’environ 3 kW et nécessitent entre 5 et 8 heures pour charger complètement la batterie. Ils sont généralement utilisés pendant les heures creuses pour bénéficier de tarifs plus avantageux [52].

b) Les chargeurs de type "rapide":

Ces chargeurs sont capables de délivrer une puissance supérieure à 10 kW et sont classés comme "rapides".

Certains modèles peuvent atteindre une puissance maximale de 150 kW [53].

Durée de recharge	Alimentation	Tension	Courant maximum	Type de charge
6 à 8 heures	Monophasée 3.3 kw	230 VAC	16 A	Lente
2 à 3 heures	Triphasée 10 kw	400 VAC	16 A	
3 à 4 heures	Monophasée 7 kw	230 VAC	32 A	
1 à 2 heures	Triphasée 22 kw	400 VAC	32 A	Rapide
20 à 30 minutes	Triphasée 43 kw	400 VAC	63 A	
20 à 30 minutes	Continue 50 kw	400 à 500 VAC	100 à 125 A	

Table 1.3: comparaison

remarque :

La distance qu'une voiture électrique peut parcourir avant d'avoir besoin d'être rechargée dépend de plusieurs facteurs, notamment la capacité de la batterie de la voiture, l'efficacité de la consommation d'énergie du moteur électrique, le style de conduite, la vitesse de conduite, les conditions routières et météorologiques, ainsi que l'utilisation des équipements de confort tels que le chauffage ou la climatisation.

En général, la distance de conduite des voitures électriques varie d'environ 100 à 400 kilomètres avant de devoir être rechargées, mais certaines voitures électriques modernes ont des batteries d'une capacité plus importante leur permettant de parcourir des distances dépassant les 500 kilomètres.

Il convient de noter que ces chiffres sont des estimations approximatives, et la distance réelle pouvant être parcourue avant de devoir recharger peut varier en fonction des facteurs mentionnés précédemment [30].

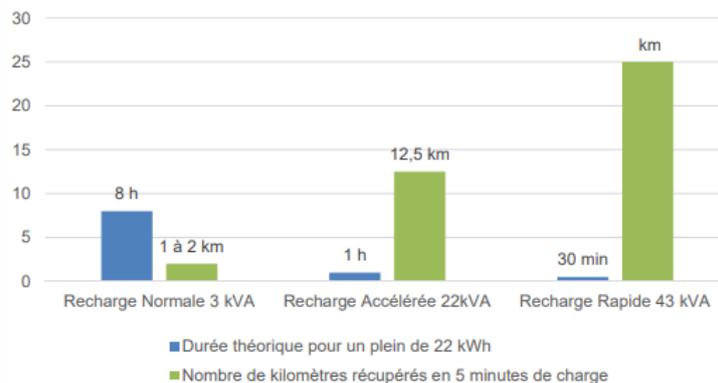


Figure 1.17: Durée théorique de recharge complète pour un véhicule électrique

1.6.3.2 Types des Connecteurs de véhicule électrique

Il existe différents types de connecteurs permettant de brancher le câble de charge au socle du véhicule.

Les connecteurs AC sont définis par la norme IEC 62196-2,
les connecteurs DC sont définis par la norme IEC 62196-3 [54].

1. Connecteur de type 1 (J1772) :

Ce connecteur est souvent utilisé en Amérique du Nord et au Japon.

Il est caractérisé par une prise de forme rectangulaire avec cinq broches.

Il est généralement utilisé pour les charges AC de niveau 1 et niveau 2 [55].

2. Connecteur de type 2 (Mennekes) :

Ce connecteur est largement utilisé en Europe.

Il comporte une prise de forme circulaire avec sept broches. Il est utilisé pour les charges AC de niveau 1 et niveau 2, et il est également compatible avec les charges rapides DC [56].

3. Connecteur de type 3 (Scame) :

Ce connecteur est moins courant et est principalement utilisé en Europe. Il possède une prise de forme rectangulaire avec cinq broches.

Il est utilisé pour les charges AC de niveau 1 et niveau 2 [56].

4. Connecteur de chargeur combiné (CCS) :

Il s'agit d'un connecteur qui combine une prise de type 2 pour les charges AC et des broches supplémentaires pour les charges rapides DC. Le CCS est utilisé pour les charges rapides DC et est compatible avec les véhicules équipés de cette technologie [57].

5. Connecteur de chargeur rapide CHAdeMO :

Il s'agit d'un connecteur spécifique utilisé pour les charges rapides DC. Il est couramment utilisé par les véhicules électriques japonais, tels que Nissan LEAF, et est également disponible sur certains autres modèles.

Ces connecteurs permettent de connecter le véhicule électrique à différentes sources de recharge, qu'il s'agisse de bornes de recharge publiques, de stations de recharge rapide ou de charge à domicile.

Il convient de noter que certains véhicules électriques sont équipés de plusieurs types de connecteurs pour offrir une compatibilité avec différents systèmes de recharge [58].

1.6.3.3 Types de sources de chargement des véhicules électriques :

a) Réseau électrique domestique :

La plupart des propriétaires de véhicules électriques rechargent leur voiture à domicile en utilisant le réseau électrique domestique. Selon une étude de l'AIE, environ 78% de la recharge des véhicules électriques se fait à domicile [59].

b) Réseau électrique public :

Les bornes de recharge publiques sont de plus en plus répandues dans les espaces publics tels que les parkings, les centres commerciaux, les stations-service, etc. Ces bornes utilisent généralement l'électricité du réseau public pour fournir la recharge [60].

c) Stations de charge rapide :

Les stations de charge rapide sont généralement connectées au réseau électrique public et utilisent des alimentations spéciales pour fournir une charge rapide aux véhicules électriques lors de longs trajets. Les sources d'électricité pour ces stations peuvent varier [61].

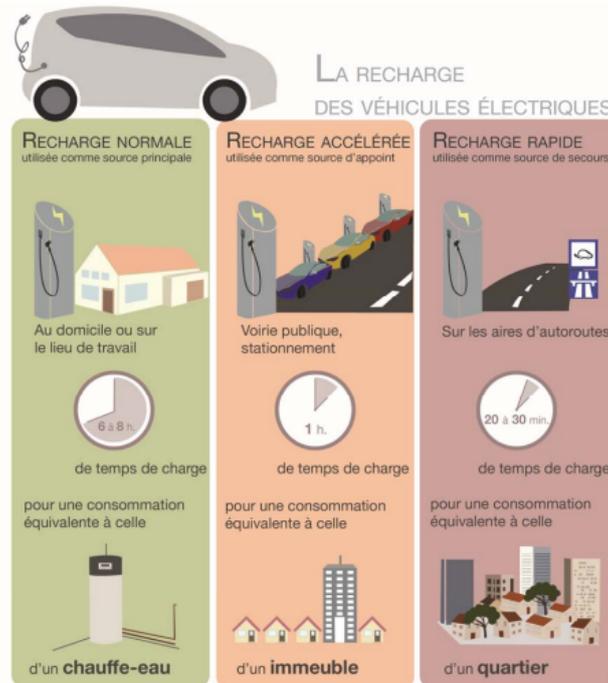


Figure 1.18: la recharge des vehicules électrique

1.6.4 Systeme de freinage

Le système de freinage d'un véhicule électrique est essentiel pour assurer la sécurité et le contrôle de la voiture. Bien que certaines des composantes de base du système de freinage soient similaires à celles des véhicules à moteur à combustion interne, il existe des différences clés en raison des caractéristiques spécifiques des voitures électriques.

Tout d'abord, il est important de noter que les véhicules électriques utilisent principalement deux types de freinage : le freinage régénératif et le freinage mécanique traditionnel [62].

1.6.4.1 Freinage régénératif

Le freinage régénératif est une caractéristique spécifique aux véhicules électriques qui permet de récupérer une partie de l'énergie cinétique lors de la décélération ou du freinage et de la convertir en énergie électrique. Contrairement aux véhicules à moteur à combustion interne, où l'énergie cinétique est dissipée sous forme de chaleur par le frottement des freins, les voitures électriques utilisent le freinage régénératif pour réduire la vitesse du véhicule tout en convertissant cette énergie en électricité [43].

Lorsqu'un conducteur relâche l'accélérateur ou appuie sur la pédale de frein dans un véhicule électrique équipé d'un système de freinage régénératif, le moteur électrique passe en mode de génération et agit comme une dynamo. En transformant l'énergie cinétique en énergie électrique, le moteur ralentit le véhicule et envoie simultanément l'électricité générée vers la batterie du véhicule pour être stockée.

Le freinage régénératif présente plusieurs avantages. Tout d'abord, il permet de prolonger l'autonomie de conduite du véhicule électrique en récupérant une partie de l'énergie qui serait autrement perdue pendant le freinage. Cela réduit la dépendance du véhicule à la batterie et augmente son efficacité énergétique globale.

De plus, le freinage régénératif permet une décélération plus douce et plus progressive par rapport au freinage traditionnel, ce qui peut contribuer à une conduite plus fluide et à un confort accru pour les passagers. Il réduit également l'usure des freins mécaniques, ce qui peut entraîner une durée de vie plus longue des plaquettes de frein et une diminution des coûts d'entretien [63].

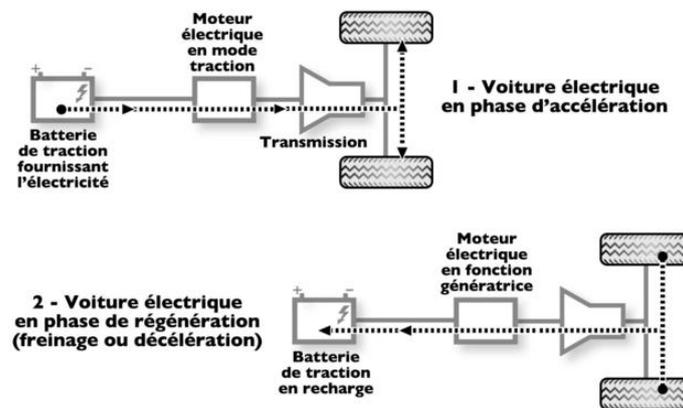


Figure 1.19: Freinage régénératif

1.6.4.2 Freinage mécanique traditionnel

Le freinage mécanique traditionnel

d'un véhicule électrique est similaire à celui des véhicules à moteur à combustion interne. Il repose sur des composants mécaniques tels que les étriers de frein, les plaquettes de frein et les disques de frein pour ralentir et arrêter le véhicule.

Lorsque le conducteur appuie sur la pédale de frein d'un véhicule électrique, le système de freinage mécanique est activé. La pression exercée sur la pédale de frein est transmise hydrauliquement aux étriers de frein, qui serrent les plaquettes de frein contre les disques de frein. Ce frottement entre les plaquettes et les disques crée une résistance qui ralentit la rotation des roues et finalement arrête le véhicule [64].

Le freinage mécanique traditionnel est particulièrement utilisé dans les situations où le freinage régénératif seul n'est pas suffisant, par exemple lors d'un freinage d'urgence ou à des vitesses plus élevées.

Dans ces cas, le freinage mécanique fournit une puissance de freinage supplémentaire pour assurer un arrêt rapide et sûr du véhicule.

En résumé, le freinage mécanique traditionnel d'un véhicule électrique utilise des composants hydrauliques tels que les étriers de frein, les plaquettes de frein et les disques de frein pour ralentir et

arrêter le véhicule. Il est utilisé en complément du freinage régénératif, fournissant une puissance de freinage supplémentaire lors de situations nécessitant un freinage plus intense [65].

1.6.5 Différentes architectures de traction :

Pour faire rouler un véhicule électrique, il existe deux types de moteurs : les moteurs à courant continu, et les moteurs à courant alternatif.

1.6.5.1 Véhicules électriques mono moteur (machine à courant continu)

C'est une architecture avec moteur à courant continu, une batterie, un variateur (un hacheur réversible), une machine à courant continu, un réducteur différentiel (réduction de la vitesse, augmentation du couple).

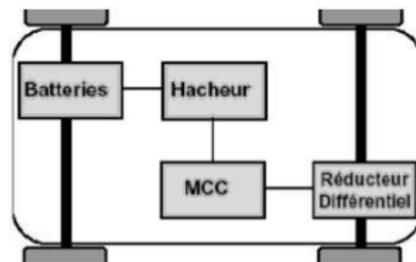


Figure 1.20: Architecture d'un véhicule électrique mono moteur

Les moteurs électriques à courant continu sont couramment utilisés dans les voitures électriques car ils sont alimentés par la batterie à courant continu et permettent un contrôle de vitesse précis ainsi qu'une excellente performance pour la propulsion électrique, avec une courbe de couple très favorable à basse vitesse.

Ces moteurs fonctionnent en utilisant un champ magnétique créé par le courant circulant dans les enroulements de cuivre du stator et les bobines du rotor. Les deux champs magnétiques s'attirent et se repoussent, entraînant la rotation du rotor et donc, la rotation de l'arbre de sortie.

Cependant, les moteurs à courant continu ont également des inconvénients. Ils nécessitent un entretien régulier des balais et des collecteurs pour assurer leur bon fonctionnement et une perte d'efficacité au fil du temps peut survenir. De plus, leur vitesse est limitée et leur puissance massique est généralement inférieure à celle des moteurs à essence, ce qui peut les rendre moins fiables et moins adaptés aux applications de voitures électriques destinées à la conduite sur autoroute. Malgré ces limites, les moteurs à courant continu restent populaires dans les voitures électriques en raison de leur capacité à fournir une propulsion électrique efficace et de leur contrôle de vitesse précis [66].

1.6.5.2 Véhicules électriques moteur (machine à courant alternatif)

Dans ce type, la chaîne énergétique est doublée, c'est une architecture avec moteur synchrone (dans la roue), une batterie, deux variateurs (onduleur), deux machines synchrones. L'onduleur est utilisé pour convertir le courant électrique continu fourni par la batterie en courant alternatif nécessaire au moteur de la voiture électrique [67].

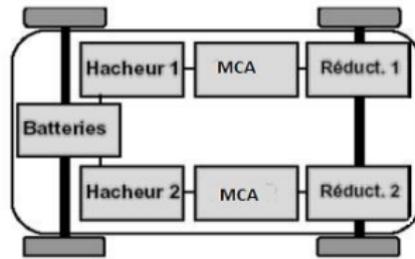


Figure 1.21: Architecture d'un véhicule électrique bi-moteur.

1.6.6 Transmission

Le moteur électrique ayant une plage de fonctionnement très élevée (16000 t/min sur une Model S (modèle d'une voiture électrique, par exemple) et un couple disponible rapidement (plus on est bas dans les régimes plus on a de couple), il n'était pas indispensable de produire une boîte de vitesses. On a donc en quelque sorte un moteur qui est directement connecté aux roues ! La démultiplication ne changera pas que vous soyez à 15 ou 200 km/h. Bien évidemment, le rythme du moteur électrique n'est pas exactement calé sur celui des roues, il y a ce que l'on appelle un réducteur. Sur une Model S il est de 10:1 environ, c'est à dire que la roue va tourner 10 fois moins vite que le moteur électrique. Le rapport de réduction est généralement obtenu par un train épicycloïdal, chose que l'on connaît surtout dans les boîtes de vitesses automatiques. Après ce réducteur il y a enfin le différentiel qui permet de faire tourner les roues à des vitesses différentes. Pas besoin d'embrayage ni de convertisseur de couple car si un moteur thermique a tout le temps besoin d'être en mouvement ce n'est pas le cas d'un moteur électrique. Il n'a donc pas de régime de ralenti ni besoin d'un embrayage qui fait le pontage entre les roues et le moteur : quand les roues s'arrêtent pas besoin de débrayer [68].

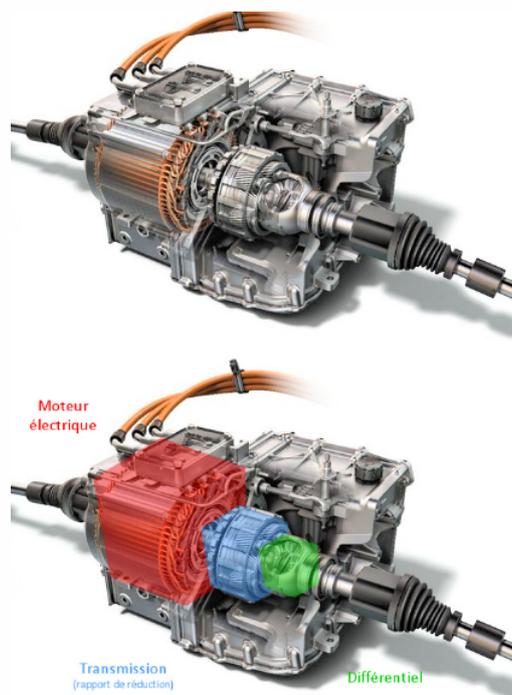


Figure 1.22: transmission

1.6.7 Calculateur de puissance

Le calculateur de puissance joue un rôle crucial dans la gestion des flux d'énergie au sein d'un véhicule électrique. Il utilise de nombreux capteurs pour surveiller et contrôler ces flux. Par exemple, lorsque l'accélérateur est enfoncé (généralement sous la forme d'un potentiomètre similaire à celui des voitures thermiques modernes), le calculateur régule le flux d'énergie envoyé au moteur en fonction de l'intensité de l'accélération. De même, lorsque l'accélérateur est relâché, le calculateur gère la récupération d'énergie en dirigeant le courant électrique généré par le moteur (qui est réversible) vers la batterie tout en régulant le débit électrique.

Le calculateur de puissance est également capable de moduler le courant en utilisant un dispositif de hachage (pour le flux de la batterie vers le moteur) ou de redresser le courant (pour la récupération d'énergie alternative vers la batterie à courant continu). Cela lui permet de contrôler efficacement la direction et la quantité d'énergie circulant dans le système électrique du véhicule.

En résumé, le calculateur de puissance est responsable de la gestion précise des flux d'énergie dans un véhicule électrique, en utilisant des capteurs et des dispositifs de modulation de courant pour optimiser l'efficacité et la performance du système électrique [69].

Différents capteurs d'une voiture électrique

Capteur d'action sur la pédale d'accélération
Capteur d'état de décharge des batteries
Capteur d'action sur la pédale de frein
Capteur frein de stationnement
Capteurs de température des moteurs électriques
Capteur de température extérieur
Capteur de pression des 4 pneus
Capteurs avant d'obstacle
Capteur radar de recul
Capteur de luminosité

Table 1.4: Différents capteurs d'une voiture électrique

1.7 L'impact des voitures électriques sur le monde

L'avènement des voitures électriques a conduit à une révolution qui a impliqué tous les secteurs et nous montrerons les changements les plus importants survenus;

1. Secteur des transports : L'introduction des voitures électriques a révolutionné l'industrie des transports. Elle offre une alternative aux véhicules traditionnels à combustion interne et réduit la dépendance aux combustibles fossiles. Ce changement a contribué à la réduction de la pollution de l'air et à l'amélioration de la qualité de l'air dans les villes.

2. Secteur de l'énergie : L'essor des voitures électriques a augmenté la demande en électricité et a entraîné la nécessité de recourir à des sources d'énergie plus propres. Cela a accéléré le développement

et l'adoption de technologies d'énergies renouvelables telles que l'énergie solaire et éolienne. Cette transition vers une énergie plus propre a conduit à une réduction des émissions de gaz à effet de serre et à un avenir énergétique plus durable.

3. Industrie automobile : L'industrie automobile a connu des transformations importantes grâce à l'introduction des voitures électriques. Les constructeurs automobiles ont investi massivement dans la recherche et le développement de technologies de véhicules électriques, notamment les avancées en matière de batteries et de groupes motopropulseurs électriques. Cela a entraîné une concurrence et une innovation accrues dans le secteur, ainsi que l'émergence de nouveaux acteurs axés sur la production de véhicules électriques.

4. Développement des infrastructures : Le déploiement des voitures électriques a nécessité le développement des infrastructures de recharge. Les gouvernements, les entreprises et les opérateurs de réseaux de recharge ont investi dans l'expansion des bornes de recharge publiques, tant dans les zones urbaines que le long des grands axes routiers. Cette expansion des infrastructures vise à atténuer l'anxiété liée à l'autonomie et à permettre les déplacements longue distance pour les propriétaires de véhicules électriques [70].

5. Comportement des consommateurs et sensibilisation : La disponibilité des voitures électriques a influencé le comportement des consommateurs et a accru la sensibilisation aux options de transport durable. De plus en plus de personnes considèrent désormais les véhicules électriques comme un choix viable, ce qui entraîne un changement dans les préférences et les décisions d'achat des consommateurs. Cette évolution de la perception a également encouragé les particuliers et les entreprises à adopter des pratiques plus respectueuses de l'environnement et à contribuer à un environnement plus propre.

6. Politiques et réglementations : L'introduction des voitures électriques a incité les gouvernements à mettre en place des politiques et des réglementations favorables. Des incitations telles que des crédits d'impôt, des subventions et des aides financières ont été mises en place pour encourager l'adoption de véhicules électriques. De plus, des normes et réglementations plus strictes en matière d'émissions ont été mises en place pour réduire l'impact environnemental des transports.

Dans l'ensemble, la sortie des voitures électriques a eu un impact transformateur sur divers aspects de la société, notamment les transports, l'énergie, l'industrie, les infrastructures, le comportement [71].

1.8 Principales différences entre les voitures électriques et les voitures thermiques

Les principales différences entre les véhicules électriques et thermiques résident dans leur mode de propulsion, leur entretien, leur coût d'utilisation et leur impact environnemental.

1. Mode de propulsion : Les véhicules électriques sont équipés d'un moteur électrique alimenté par une batterie, tandis que les véhicules thermiques sont équipés d'un moteur à combustion interne alimenté par de l'essence ou du diesel. Cette différence fondamentale dans la technologie de propulsion a un impact sur les performances, la puissance et la plage d'autonomie des véhicules.
2. Entretien : L'entretien des véhicules électriques est généralement moins coûteux que celui des véhicules thermiques. Les véhicules électriques ont moins de pièces mobiles et d'éléments sujets à l'usure, ce qui réduit les besoins en entretien régulier. Par exemple, ils n'ont pas besoin de vidanges d'huile fréquentes ni de remplacement de filtres à air. Cela peut entraîner des économies significatives à long terme .

3. Coût d'utilisation : Les véhicules électriques ont généralement des coûts d'utilisation inférieurs à ceux des véhicules thermiques. Les coûts de carburant sont considérablement réduits car l'électricité est moins chère que l'essence ou le diesel. De plus, les véhicules électriques sont souvent exemptés de certaines taxes et bénéficient de subventions gouvernementales, ce qui peut contribuer à réduire davantage les coûts d'utilisation
4. Impact environnemental : Les véhicules électriques sont considérés comme plus écologiques que les véhicules thermiques en raison de leur absence d'émissions directes de gaz à effet de serre lors de leur utilisation. Contrairement aux véhicules thermiques, les véhicules électriques ne produisent pas de polluants atmosphériques nocifs lorsqu'ils sont en marche. Cependant, il est important de noter que l'impact environnemental global des véhicules électriques dépend également de la source d'électricité utilisée pour les recharger

En conclusion, les principales différences entre les véhicules électriques et thermiques résident dans leur mode de propulsion, leur entretien, leur coût d'utilisation et leur impact environnemental. Les véhicules électriques offrent des avantages potentiels en termes de coûts d'exploitation réduits et d'impact environnemental moindre, tandis que les véhicules thermiques ont généralement une plus grande autonomie et une infrastructure de recharge plus répandue à l'heure actuelle [72].

Les différences	véhicules électriques	véhicules a combustion interne
source d'energie principale	batterie électrique	carburant (comme l'essence ou le diesel)
émissions environnementales	aucune émission nocive	émissions de gaz nuisibles à l'environnement
efficacité énergétique	conversion efficace de l'énergie en mouvement	perte d'énergie lors de la combustion
coût d'exploitation et de maintenance	coûts de charge et de maintenance inférieurs	coûts de maintenance et d'achat de carburant
autonomie et disponibilité des stations de charge	autonomie limitée et nécessite d'un réseau de recharge	autonomie longue et stations de carburant disponibles
performance et accélération	accélération rapide et performances puissantes	performances et accélérations rapides possibles
bruit et nuisances sonores	très silencieuses, réduction du bruit	bruit généré par la combustion
technologie et innovation	technologies modernes et innovations durables	technologies traditionnelles et améliorations modestes

Table 1.5: Les différences entre les VE et VMCI

1.9 Comparaison des émissions

Lorsque l'on compare les voitures ordinaires (propulsées par des moteurs à combustion interne) et les voitures électriques en termes d'émissions, il existe des différences significatives.

1. Émissions de gaz à effet de serre: Les voitures ordinaires émettent des gaz à effet de serre (GES) tels que le dioxyde de carbone (CO₂), le méthane et l'oxyde nitreux lors de la combustion de combustibles fossiles. Ces émissions contribuent au changement climatique. Les voitures électriques, en revanche, ne produisent aucune émission d'échappement car elles sont alimentées à l'électricité. Cependant, les émissions associées aux voitures électriques dépendent de la source de production d'électricité. Si l'électricité provient de sources renouvelables comme l'énergie solaire ou éolienne, les émissions peuvent être nettement inférieures à celles des voitures ordinaires.

2. Polluants atmosphériques: Les voitures ordinaires rejettent dans l'atmosphère des polluants tels que des oxydes d'azote (NO_x), des particules (PM) et des composés organiques volatils (COV), qui contribuent à la pollution de l'air et aux problèmes respiratoires. Les voitures électriques ne produisent aucune émission directe de ces polluants, ce qui améliore la qualité de l'air dans les zones urbaines [73].

3. Efficacité énergétique: Les voitures électriques sont généralement plus économes en énergie que les voitures à moteur à combustion interne. Les moteurs électriques convertissent un pourcentage plus élevé d'énergie de la batterie pour alimenter les roues, tandis que les moteurs à combustion interne ont un rendement inférieur en raison des pertes d'énergie lors de la combustion et des processus mécaniques. Cette efficacité énergétique accrue des voitures électriques contribue à réduire la consommation globale d'énergie et les émissions associées [51].

4. Émissions du cycle de vie: Lorsque l'on considère le cycle de vie d'un véhicule, y compris la fabrication, la production de carburant et le fonctionnement, les voitures électriques peuvent avoir des émissions inférieures à celles des voitures ordinaires. La production de véhicules électriques peut avoir des émissions plus élevées en raison de la fabrication de batteries, mais cela est compensé par les émissions plus faibles pendant la phase opérationnelle et le potentiel d'utilisation d'énergies renouvelables pour la recharge.

5. Pollution sonore: Les voitures électriques produisent moins de bruit que les voitures à moteur à combustion interne, ce qui peut aider à réduire la pollution sonore dans les zones urbaines.

Il est important de noter que les avantages environnementaux des voitures électriques sont influencés par des facteurs tels que la source de production d'électricité, les méthodes de production des batteries et le bouquet énergétique global d'une région. Cependant, en général, les voitures électriques ont le potentiel de réduire considérablement les émissions et de contribuer à un secteur des transports plus propre et plus durable [74].

bilan carbone		en tonnes de CO ₂	
voiture électrique		voiture thermique	
fabrication		fabrication	
6.57		3.74	
utilisation		(150000)km	
2.34		18.26	
bilan		bilan	
8.91		22	

Table 1.6: Bilan carbone électrique vs essence (pour une durée de vie de 150 000 Km)

1.10 Avantages et inconvénient des véhicules électriques :

1.10.1 Avantages :

Les avantages des véhicules électriques par rapport aux véhicules à combustion interne peuvent être énumérés comme suit :

- Réduction de la pollution sonore car les véhicules électriques sont totalement silencieux. Conduite plus agréable grâce à une accélération continue et progressive et à l'absence d'embrayage.
- Architecture technique simple, avec 6000 pièces de moins qu'une voiture traditionnelle.
- Coûts d'entretien réduits de 30 à 40% en raison de la simplicité de la technologie et des rares occasions de pannes.
- Adaptation parfaite au milieu urbain grâce à la récupération d'énergie lors des freinages et des embouteillages.
- Rendement énergétique trois fois supérieur à celui des moteurs thermiques. Démarrage rapide et facile en appuyant simplement sur un bouton.

1.10.2 Inconvénients:

Malgré les nombreux avantages de la voiture électrique, il existe également des inconvénients à prendre en compte, notamment :

- L'autonomie limitée de la voiture électrique.
- La nécessité de maintenir la voiture aussi légère que possible pour maximiser son efficacité énergétique, ce qui peut limiter la taille et le confort de la voiture.
- Le coût élevé des technologies innovantes utilisées dans les voitures électriques, qui peut se répercuter sur leur prix d'achat.
- La durée de recharge des batteries électriques est encore relativement longue.
- De plus, le moteur électrique ne produit pas de chaleur lors de son utilisation, ce qui peut limiter le confort à l'intérieur de la voiture, notamment pour le chauffage.
- Pour pallier à cela, la décharge des batteries est accélérée, ce qui peut avoir un impact sur leur durée de vie et sur la puissance du moteur électrique.

1.11 conclusion

les voitures électriques font partie de l'avenir de l'industrie automobile. Avec le développement des technologies et l'amélioration de l'efficacité des batteries, les voitures électriques peuvent devenir une alternative réelle et efficace aux voitures conventionnelles à carburant. Des études montrent que l'utilisation de véhicules électriques peut améliorer la qualité de l'air et réduire les émissions nocives, ce qui en fait un excellent choix pour la conservation de l'environnement. Bien que les voitures électriques présentent de nombreux avantages, il y a aussi quelques inconvénients à considérer, tels que le coût

plus élevé et l'autonomie limitée des déplacements. Cependant, ces obstacles devraient s'améliorer à mesure que la technologie progressera à l'avenir. Au final, l'utilisation d'une voiture électrique dépend des besoins et des préférences personnelles de chaque individu. De plus, cette décision peut conduire à l'amélioration de notre vie et de la vie de l'environnement dans lequel nous vivons. On peut dire que les voitures électriques sont un excellent choix pour l'avenir, alliant efficacité, flexibilité et protection de l'environnement. Et lorsqu'ils sont utilisés correctement, ils peuvent aider à améliorer le monde dans lequel nous vivons. Dans ce chapitre, nous avons fait une présentation générale des véhicules électriques (VE) puis nous avons nommé leurs différents types ainsi que leurs classification selon les sources d'énergie, ensuite Nous avons présenté aussi l'architecture des chaines de tractions des (VEs) tout en se basant sur les différentes technologies utilisées pour ce type de véhicule.

Généralités sur la maintenance industrielle

2.1 Introduction

L'industrie d'aujourd'hui est composée de centaines de millions d'équipements et de machines complexes utilisés dans la production de divers produits. Pour assurer une productivité maximale et une qualité optimale, ces équipements doivent fonctionner correctement 24 heures sur 24 et 7 jours sur 7. Ainsi, l'industrie a besoin d'une maintenance efficace et continue.

La maintenance des équipements et des machines industrielles est vitale pour assurer un fonctionnement continu et une efficacité de la productivité. Bien que les coûts de maintenance semblent élevés, ils sont le meilleur choix en termes de coût à long terme, car ils permettent d'éviter les pannes et les arrêts de production, de réduire les coûts liés à la réparation des pannes et au remplacement des équipements.

Le processus de maintenance industrielle comprend un ensemble d'activités telles que la maintenance préventive, corrective, diagnostique, analytique et compensatoire. Ces activités utilisent différentes techniques telles que la maintenance préventive périodique, l'analyse électrique, l'analyse hydraulique, les rayons X, l'analyse non-destructive, l'analyse thermique et bien d'autres.

Dans ce chapitre, nous explorerons davantage d'informations sur le sujet de la maintenance industrielle de manière générale. Nous discuterons des différentes activités liées à la maintenance industrielle et des techniques utilisées, ainsi que des différentes méthodes utilisées pour améliorer l'efficacité de la maintenance et réduire les coûts qui y sont associés.

2.2 Définition de la maintenance industrielle

Selon la norme AFNOR NF-X 60 000, la maintenance englobe toutes les actions visant à maintenir ou rétablir un équipement dans un état de fonctionnement spécifié pour répondre aux exigences de performance. Elle comprend des activités techniques telles que la prévention, le dépannage, la révision, la vérification, la réparation, le contrôle et le diagnostic, ainsi que des activités administratives et de gestion pour garantir la production.

La direction doit fixer des objectifs pour élaborer une stratégie de maintenance en prenant en compte les enjeux humains, techniques, de sécurité, financiers, etc. La stratégie de maintenance permet ensuite de déterminer les types de maintenance à mettre en œuvre.

La norme NF-X 60 000 distingue deux grandes catégories de maintenance : la maintenance corrective et la maintenance préventive.

La maintenance corrective vise à réparer les équipements lorsque leur performance est altérée ou qu'ils ne fonctionnent plus.

La maintenance préventive, quant à elle, a pour objectif de prévenir les défaillances en effectuant des opérations planifiées, telles que la maintenance prédictive, la maintenance conditionnelle ou la maintenance préventive systématique. [75]

2.3 Différents types de maintenance

La qualité des programmes de maintenance joue un rôle crucial dans la productivité des entreprises industrielles. Cependant, chaque industrie a des besoins spécifiques en matière de maintenance pour maintenir l'efficacité de ses équipements. Malgré cela, ces concepts peuvent être difficiles à comprendre pour les personnes impliquées dans ces entreprises ou être méconnus d'entre elles.

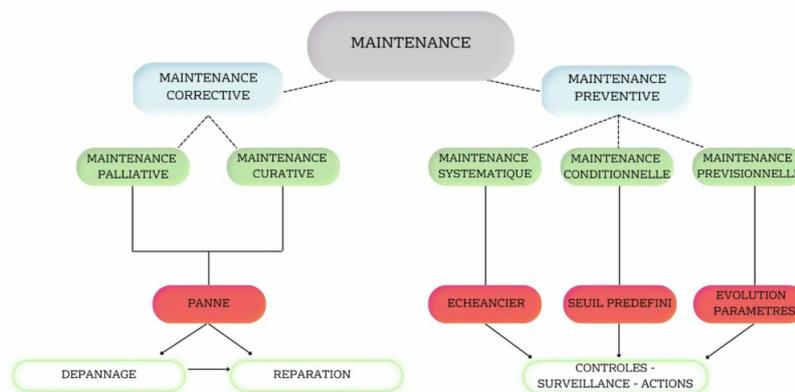


Figure 2.1: Différents types de maintenance

2.3.1 Maintenance préventive

La maintenance préventive a pour objectif de réduire la probabilité de défaillance des équipements en cours d'utilisation, de diminuer les temps d'arrêt en cas de révision ou de panne, et de supprimer les causes d'accidents graves en se basant sur des critères prédéterminés. Elle implique des vérifications régulières de conformité et de surveillance pour détecter des anomalies et réaliser des ajustements simples sans outillage spécifique ou interruption de la production.

Cependant, toute intervention de maintenance engendre des coûts. L'analyse des coûts doit donc démontrer un gain par rapport aux défaillances évitées pour justifier l'adoption de la maintenance préventive plutôt que la maintenance corrective, qui est généralement plus coûteuse. C'est à ce stade que l'entreprise doit décider de passer à une maintenance corrective si nécessaire. [76]

2.3.1.1 Maintenance préventive systématique

La maintenance préventive systématique est planifiée selon un calendrier fixe basé sur le temps ou le nombre d'unités d'utilisation, sans inspection préalable de l'équipement.

La fréquence des interventions est déterminée à partir de la mise en service de l'équipement ou à la suite d'une révision partielle ou complète. [77]

2.3.1.2 Maintenance préventive conditionnelle

La maintenance préventive conditionnelle consiste à surveiller l'équipement en fonction d'un événement prédéfini, tel que l'auto-diagnostic ou l'information de capteurs, afin de recueillir des informations en temps réel à l'aide de techniques comme la tribologie ou la thermographie par infrarouge.

L'objectif est d'intervenir au moment où l'équipement a atteint le seuil d'usure ou de dégradation fixé préalablement, pour réaliser la bonne opération au bon moment et maîtriser les coûts de maintenance.

[78]

2.3.2 Maintenance corrective

La maintenance corrective est mise en œuvre suite à la détection d'une panne ou d'une défaillance. Elle consiste à réparer ou remplacer les composants défectueux pour remettre le bien en état de fonctionnement optimal. En d'autres termes, il s'agit d'un dépannage réalisé après la survenue d'un incident pour rétablir le bon fonctionnement du bien et assurer la continuité de la production [79]

On distingue deux types de maintenance corrective:

2.3.2.1 Maintenance palliative

La maintenance palliative correspond à une intervention de dépannage. Elle vise à remettre provisoirement en état de fonctionnement une machine ou un outil en attendant sa réparation définitive. Le dépannage permet d'éviter l'arrêt total de la production en maintenant un fonctionnement partiel ou limité de l'équipement, on parle alors de reprise de production en mode « dégradé ».

Le dépannage consiste en des actions physiques immédiates et temporaires pour permettre au bien de remplir sa fonction requise pendant une durée limitée, jusqu'à ce que la réparation définitive soit effectuée. [80]

2.3.2.2 Maintenance curative

La maintenance curative vise à réparer les causes et conséquences de la panne en profondeur, souvent en remplaçant la pièce défectueuse par une neuve. Contrairement à la maintenance palliative, il s'agit d'une action durable qui permet à l'équipement de reprendre une production normale sur le long terme.

En d'autres termes, la maintenance curative est une réparation effectuée pour rétablir la fonction requise d'un bien en panne. [81]

2.4 Niveau de maintenance

La préservation d'un parc de machines, avec pour objectifs de maintenir la valeur des équipements, leur performance et leur sécurité, est essentielle pour assurer un fonctionnement optimal. Cela implique une maintenance adéquate qui nécessite une compréhension des différents niveaux d'interventions. L'Association française de normalisation (AFNOR) a défini les cinq niveaux de maintenance dans sa norme X 60-010 de 1994.

Chaque niveau correspond à la complexité de l'opération de maintenance, au niveau d'expertise requis et à l'importance des moyens nécessaires tels que l'outillage, la technologie et l'espace requis pour mener à bien la tâche. La connaissance de ces niveaux est cruciale pour assurer une maintenance efficace et garantir la fiabilité des équipements. [82]

2.4.1 Maintenance de Niveau 1

Le niveau 1 de maintenance englobe des opérations simples et de faible complexité, qui peuvent être réalisées par du personnel non spécialisé et ne nécessitent que peu ou pas de pièces ou de consommables. Ces actions préventives et correctives incluent des tâches basiques telles que le graissage, le relevé de compteurs, le test de voyants, le remplacement d'ampoules, etc.

Ces opérations sont généralement effectuées sur des composants facilement accessibles et ne présentant pas de risques de sécurité particuliers. Les opérateurs chargés de leur exécution peuvent suivre des instructions visuelles de travail, sans nécessiter une expertise technique avancée. La réalisation efficace de ces tâches de maintenance de niveau 1 contribue à prévenir les défaillances mineures et à maintenir la performance et la sécurité des équipements.

2.4.2 Maintenance de Niveau 2

Le niveau 2 de maintenance comprend des tâches de maintenance qui sont plus complexes que celles du niveau 1, mais qui restent relativement simples. Il s'agit d'actions de maintenance préventive ou corrective qui sont exécutées en suivant des procédures simples.

Ces tâches sont généralement confiées à des techniciens ou des opérateurs ayant reçu une formation spécifique. Elles comprennent diverses opérations telles que des réglages, la vérification des capteurs, le remplacement de courroies ou de tresses, etc.

Bien que ces opérations soient plus complexes que celles du niveau 1, elles restent relativement simples et ne nécessitent pas de compétences techniques avancées. Cependant, une formation spécifique est requise pour assurer une exécution correcte de ces tâches de maintenance de niveau 2, ce qui contribue à garantir la performance et la sécurité des équipements. [83]

2.4.3 Maintenance de Niveau 3

Le niveau 3 de maintenance requiert l'intervention de techniciens spécialisés. Ces professionnels peuvent intervenir sur le site où se trouve la machine ou dans l'espace réservé au service de maintenance. Les procédures de maintenance appliquées à ce niveau sont plus complexes et nécessitent souvent un diagnostic préalable avant toute intervention.

Les opérations de maintenance de niveau 3 comprennent des tâches de maintenance préventive, telles que la vérification de la combustion dans une chaudière ou tout ajustement nécessitant l'utilisation d'instruments de mesure, ainsi que des actions correctives comme le remplacement de pompes ou de vérins.

Ces tâches nécessitent des compétences techniques avancées et une expertise spécialisée, ainsi qu'un accès à des outils et équipements spécifiques pour effectuer les diagnostics et les réparations nécessaires. En conséquence, les techniciens spécialisés sont responsables de l'exécution de ces tâches pour garantir la performance et la sécurité des équipements. [84]

2.4.4 Maintenance de Niveau 4

La norme AFNOR 60-010 définit le 4^{ème} niveau de maintenance qui englobe des opérations de grande importance, nécessitant une expertise technique particulière.

Les techniciens en charge de ces interventions doivent avoir une qualification spécifique et travaillent généralement en équipe sous la supervision d'un responsable spécialisé.

Ces opérations de maintenance peuvent être préventives, telles que des analyses de vibrations ou de niveaux de chaleur par infrarouge, ou des travaux correctifs, tels que la révision d'une pompe. [80]

2.4.5 Maintenance de Niveau 5

Les interventions de maintenance classées dans le Niveau 5 sont les plus complexes et requièrent des moyens similaires à ceux utilisés pour la fabrication des équipements. Elles sont généralement confiées au constructeur ou au reconstruteur et portent sur des équipements lourds nécessitant une remise en conformité. [85]

2.5 Objectifs principaux, spécifiques et opérationnels d'une maintenance industrielle

L'objectif principal de la maintenance industrielle consiste à garantir le bon fonctionnement des équipements de production au sein d'une entreprise industrielle. Cette pratique régulière revêt une importance stratégique dans le secteur industriel, étant donné l'évolution constante des technologies de gestion et la nécessité de réduire les coûts de production pour rester compétitif. Il est donc primordial de toujours anticiper les besoins futurs.

Plus précisément, la maintenance industrielle vise à prévenir et éliminer les dysfonctionnements des équipements de production, en particulier des compresseurs industriels. [86]

Cette recherche constante de performance dans les différents systèmes de production accorde une place centrale à la maintenance industrielle pour garantir la qualité optimale des produits fabriqués et des services proposés aux clients. En conséquence, chaque usine industrielle doit accorder une importance primordiale à la maintenance opérationnelle pour atteindre les objectifs qu'elle s'est fixée.

Les principaux objectifs de la maintenance industrielle sont les suivants :

atteindre les niveaux de production prévus, garantir la conformité aux normes de qualité des produits fabriqués, éviter les temps d'arrêt de production et de livraison des produits finis aux distributeurs
réduire les pollutions et préserver l'environnement.

ainsi que protéger les travailleurs et améliorer les conditions de travail. [87]

2.6 Politiques et stratégies de maintenance

Dans la gestion de maintenance on distingue les notions de politique et de stratégie de maintenance suivantes :

2.6.1 Politique de maintenance

définit les méthodes de management utilisées en vue d'atteindre les objectifs de maintenance.

2.6.2 Stratégie de maintenance

définit un type ou une combinaison de types de maintenance (corrective, préventive, améliorative) à appliquer à un équipement donné dans le but d'optimiser

la production sur ce dernier Différents concepts de maintenance existent, parmi lesquels : [88]

- La maintenance productive totale (TPM) : vise à impliquer l'ensemble des personnels de l'entreprise dans la gestion de la maintenance pour améliorer la productivité et la qualité des équipements.
- La maintenance qualité totale, centrée sur la fiabilité (MBF) : vise à optimiser la fiabilité des équipements en mettant en place des méthodes de maintenance préventive et en analysant les causes des défaillances. [89]
- La maintenance basée sur le risque (MBR) : consiste à évaluer les risques associés aux équipements et à planifier les interventions de maintenance en fonction de leur criticité.
- La maintenance en conception (MC) : vise à prendre en compte les besoins de maintenance dès la conception des équipements pour améliorer leur fiabilité et faciliter leur maintenance.
- Le benchmarking ou le maintien en conditions opérationnelles (MCO) : consiste à comparer les pratiques de maintenance avec celles des entreprises les plus performantes pour identifier les bonnes pratiques et les améliorations potentielles.

2.7 Analyse du système de maintenance

2.7.1 Missions du service maintenance

Il est possible de passer d'une approche de maintenance verticale, spécifique à chaque filiale de production avec son propre vocabulaire, outils et équipements, à une approche transversale basée sur les concepts, méthodes et organisation communs à l'ensemble de l'entreprise.

Dans cette nouvelle approche, les missions de la maintenance peuvent être classées en trois plans interdépendants. [90]

- Au niveau technique :

les missions de maintenance visent à accroître la durée de vie des équipements et à améliorer leur disponibilité et leurs performances.

- Sur le plan économique :

la maintenance a pour objectif de réduire les coûts de défaillance, ce qui permet d'améliorer les prix de revient, et de réduire le coût global de possession de chaque équipement sensible.

- sur le plan social :

les missions de maintenance visent à réduire le nombre d'interventions en urgence, ce qui contribue à réduire le risque d'accidents. De plus, cette nouvelle approche permet de revaloriser la nature du travail en favorisant l'esprit d'équipe, la polyvalence, la qualité, l'initiative et l'anticipation. [91]

2.7.2 Fonctions d'un système de maintenance

Les fonctions d'un système de maintenance peuvent être divisées en deux sous-ensembles complémentaires :

- D'une part, les activités techniques qui concernent les tâches industrielles primaires d'entretien. Elles sont souvent supervisées pour traiter des systèmes complexes, tels que les centrales nucléaires. [92]

- D'autre part, les activités de gestion et d'organisation de la maintenance, qui concernent la gestion du parc d'équipements, la gestion des ressources humaines et matérielles, la documentation, ainsi que l'organisation des activités liées à la maintenance. Ces tâches de gestion et d'organisation sont indispensables pour optimiser l'efficacité et la rentabilité de la maintenance, tout en garantissant la sécurité des installations et la satisfaction des clients [93]

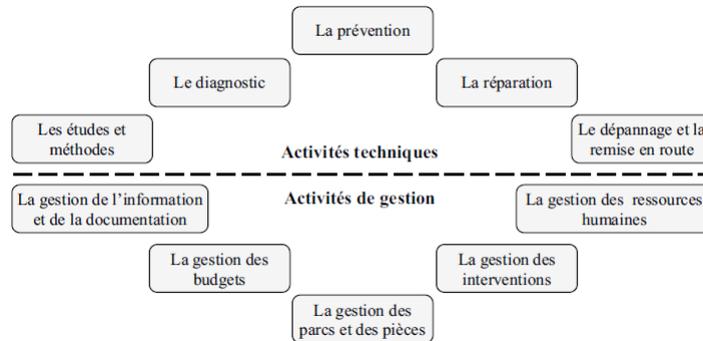


Figure 2.2: Le contenu fonctionnel d'un système de maintenance

2.7.3 Systèmes d'information et la maintenance

2.7.3.1 Qu'est-ce qu'un logiciel GMAO

Un logiciel de GMAO, qui signifie littéralement "Gestion de la Maintenance Assistée par Ordinateur", est un outil numérique disponible sur ordinateur et mobile qui permet de gérer la maintenance préventive ou corrective d'équipements. Il est essentiel pour les techniciens sur le terrain, mais également pour les gestionnaires chargés d'organiser et de planifier les interventions, ainsi que pour la direction qui souhaite disposer d'indicateurs clés de performance (KPI) pour suivre l'évolution de l'activité. [94]

Les logiciels de GMAO peuvent être utilisés dans tous les secteurs d'activité qui nécessitent la maintenance d'équipements. Si la maintenance est effectuée pour le compte de clients, il peut être judicieux de combiner le logiciel de GMAO avec un ERP tel que Organilog, qui intègre des fonctionnalités commerciales. Cette association permettra d'optimiser l'efficacité de la gestion de la maintenance et de répondre aux besoins des clients de manière professionnelle.

2.7.3.2 Rôle d'une GMAO

La GMAO est un outil indispensable dans le secteur industriel, car elle remplit plusieurs fonctions. Elle permet aux opérationnels et à l'équipe encadrante de :

- Identifier et gérer les équipements nécessitant une maintenance, en réalisant un inventaire et en suivant leur localisation et les informations relatives à leur type.
- Gérer les différentes formes de maintenance, qu'il s'agisse de maintenance préventive, curative, corrective ou améliorative.
- Gérer les demandes d'intervention (DI) et assurer leur suivi.

- Optimiser la gestion des stocks de pièces de rechange en tenant à jour le magasin, en contrôlant mieux les réapprovisionnements et en veillant à la valorisation des stocks.
- Gérer les achats de fournitures et de prestations (notamment la location de matériel) en gérant les demandes d'achats, les commandes et la facturation fournisseurs.
- Coordonner le personnel et les plannings, en planifiant les activités, en suivant les métiers, en gérant le plan de charge et en effectuant des prévisions.
- Assurer une gestion rigoureuse des coûts et du budget, en préparant les budgets, en effectuant un suivi périodique et en rédigeant des rapports d'écart entre les prévisions et les coûts réels. [95]

2.7.3.3 Avantages de la GMAO

La GMAO présente de nombreux avantages pour les industriels qui décident d'intégrer cette solution dans leur système informatique. En voici quelques-uns :

- Amélioration du taux de disponibilité des équipements et meilleure analyse de leur durée de vie et de leur amortissement à long terme.
- Réduction des coûts de maintenance grâce à une meilleure gestion des stocks de pièces de rechange et à l'optimisation de l'organisation du service technique.
- Amélioration de la gestion du stock grâce à la traçabilité des équipements, la prévention des incidents, la planification et le suivi des contrôles réglementaires.
- Maîtrise de la qualité des services clients de l'unité grâce au suivi de l'évolution du taux de panne et aux indicateurs délivrés par le logiciel.
- Centralisation des documentations techniques, administratives et financières des équipements et traçabilité des historiques et des coûts liés aux opérations de maintenance effectuées sur chaque équipement.
- Amélioration de la prise de décision sur le renouvellement d'un matériel, le budget maintenance interne et externe à allouer aux équipements, le choix des partenaires (fournisseurs, sous-traitants et fabricants), etc.

En somme, la GMAO est un outil précieux pour optimiser la gestion de la maintenance, réduire les coûts et améliorer la performance des équipements tout en offrant une meilleure visibilité sur les activités de maintenance. [96]

2.8 Outils méthode maintenance : 8 techniques à connaître

La maintenance industrielle peut être un sujet difficile à aborder pour de nombreuses entreprises. Cependant, il existe de nombreux outils et méthodes de maintenance faciles à comprendre qui permettent de la maîtriser efficacement. Avec ces outils en place, la gestion de la maintenance industrielle devient beaucoup plus facile et peut être réalisée de manière plus efficace. [97]

2.8.1 Outil méthode maintenance 1 : la TPM

La TPM (Maintenance Productive Totale) est une technique de maintenance qui est apparue pour la première fois au Japon en 1971. Son objectif est d'améliorer le rendement des machines d'une entreprise en évitant les arrêts non planifiés, les pertes de temps associées au démarrage des machines et les retouches ou déchets résultant de performances machines médiocres. En conséquence, cela permet d'éviter les pertes de productivité causées par des équipements défectueux ou des erreurs humaines. La TPM se compose de trois outils clés : le taux de rendement synthétique (TRS), les 5S et l'auto-maintenance

Trois principes importants sont requis dans la TPM :

1. le TRS : ou taux de rendement synthétique, qui est un indicateur mesurant le taux d'utilisation des machines
2. l'auto-maintenance : L'auto-maintenance est une pratique qui permet aux opérateurs de production de prendre en charge des tâches simples de maintenance, afin de réduire les interruptions de production liées aux pannes et aux dysfonctionnements. Cette approche implique la formation des opérateurs à la maintenance préventive et à l'identification des signes précurseurs de problèmes, ce qui permet de détecter les problèmes avant qu'ils ne deviennent critiques. En outre, l'auto-maintenance peut aider à améliorer la communication et la collaboration entre les opérateurs et les techniciens de maintenance, contribuant ainsi à une meilleure gestion de la maintenance des machines. [98]
3. le 5s :
 - Seiri – ordonner
 - Seiton – ranger
 - Seiso – dépoussiérer
 - Seiketsu – rendre évident
 - Shitsuke – être rigoureux

2.8.2 Outil méthode maintenance 2 : le PDCA

La Roue de Deming, également connue sous l'acronyme PDCA, est une méthode qui permet d'améliorer la planification et la gestion de projets industriels. Cet outil est utile pour concrétiser des idées en les découpant en étapes claires, afin de suivre leur progression de manière efficace. L'acronyme PDCA correspond aux étapes suivantes :

- Planifier (P) : définir un plan d'action clair
- Réaliser (D) : exécuter les actions prévues
- Vérifier (C) : s'assurer que le travail effectué correspond au plan initial
- Agir (A) : réagir et ajuster le plan en fonction des résultats obtenus.

En somme, la Roue de Deming permet de créer un cercle vertueux d'amélioration continue pour atteindre les objectifs fixés et garantir la qualité du travail effectué. [99]

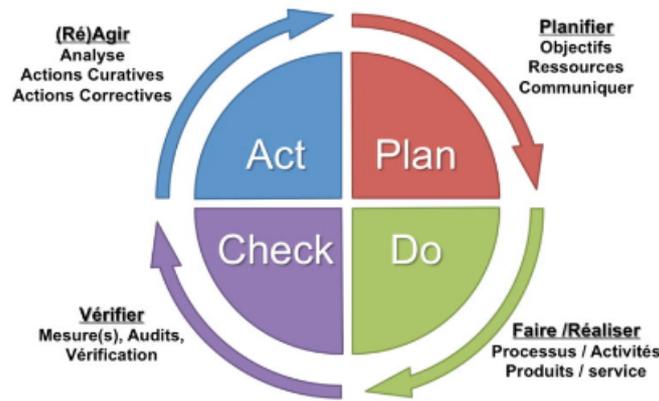


Figure 2.3: Exemple de PDCA – Roue de Deming

2.8.3 Outil méthode maintenance 3 : le diagramme d’Ishikawa

Le diagramme d’Ishikawa, également connu sous le nom de diagramme de causes et effets, 5M ou diagramme en arêtes de poisson, est largement utilisé dans la gestion de la qualité pour identifier les causes possibles d’un problème donné et ses effets sur l’entreprise.

Ce diagramme est facile à utiliser : il suffit de lister toutes les causes potentielles liées à la problématique et de les classer en différentes catégories. Par exemple, pour une machine, vous pouvez créer des catégories telles que l’électricité, la mécanique, l’hydraulique, l’automatisme, etc. et y inclure tous les problèmes qui peuvent être rencontrés sur la machine.

Cet outil visuel est particulièrement utile dans la gestion des risques associés à la gestion de projet, car il permet d’anticiper un large éventail de difficultés qui pourraient avoir des conséquences catastrophiques sur l’activité de l’entreprise. [100]

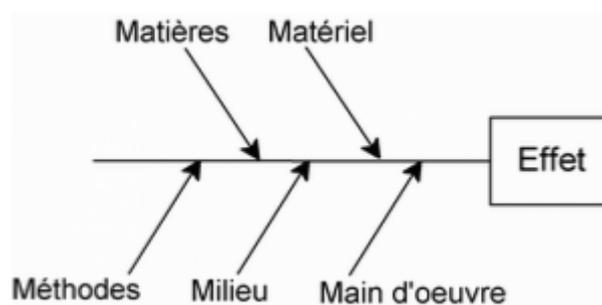


Figure 2.4: Le diagramme de causes et effets

2.8.4 Outil méthode maintenance 4 : le QQQQCCP

Le QQQQCCP est une méthode simple et rapide de questionnement qui permet de répondre à des problématiques industrielles en posant les questions suivantes : qui, quoi, où, quand, comment, combien et pourquoi.

Cette méthode permet de rassembler un ensemble d'informations précises et de mieux comprendre la problématique en isolant les priorités et en les classant selon leur importance. En utilisant cette méthode, il est possible d'agir rapidement en trouvant des solutions et des propositions pour résoudre le problème. [101]

2.8.5 Outil méthode maintenance 5 : Pareto ou l'analyse ABC

La méthode d'analyse Pareto, aussi connue sous le nom de la méthode des 20-80, permet d'identifier les causes principales des pannes en termes de fréquence et de temps passé. Cette méthode révèle que 20% ou moins des causes sont responsables de 80% des problèmes dans une usine, ce qui permet d'analyser toutes les problématiques pour trouver des solutions adaptées. Pour utiliser cette méthode, il est nécessaire de disposer d'un historique de défaillance. La plateforme de gestion de maintenance assistée par ordinateur (GMAO) nouvelle génération Mobility Work est équipée d'un module d'analytique qui permet d'exploiter automatiquement les données de l'historique de défaillance. Les prévisions générées par cet outil reposent sur les données collectées auprès de milliers d'utilisateurs travaillant sur des équipements similaires.

L'analyse ABC repose sur le même principe que l'analyse Pareto et en est directement dérivée. Cette méthode de classification est couramment utilisée dans l'analyse des stocks. [102]

2.8.6 Outil méthode maintenance 6 : l'AMDEC

L'AMDEC (Analyse des modes, des effets et de la criticité des défaillances) est une méthode d'analyse préventive qui vise à assurer la fiabilité d'un produit, d'un processus de fabrication, d'un moyen de production ou d'un flux d'information. Elle permet d'identifier les problèmes potentiels et de hiérarchiser les défaillances redoutées afin de définir des actions correctives efficaces. L'objectif est d'améliorer la qualité et la sécurité du produit ou du processus en question en agissant de manière préventive plutôt que curative. Cette méthode peut être utilisée durant les phases de conception et d'exploitation d'un système de gestion de maintenance assistée par ordinateur (SGMAO). [103]

L'AMDEC est largement utilisée dans différents secteurs industriels tels que l'automobile, l'aéronautique, le ferroviaire, etc. Une méthode dérivée de l'AMDEC, appelée HACCP, est également utilisée dans les industries agro-alimentaires, chimiques et pharmaceutiques. Bien que l'AMDEC soit un outil puissant pour la sûreté de fonctionnement, elle ne permet pas de prendre en compte les interactions entre les défaillances potentielles, notamment lorsque plusieurs défaillances surviennent simultanément. Par exemple, dans l'aéronautique, les accidents d'avions sont rarement dus à une seule défaillance mais plutôt à plusieurs défaillances qui se manifestent simultanément. Par conséquent, l'AMDEC doit être utilisée en complément d'autres méthodes d'analyse et ne doit pas être considérée comme une fin en soi. En effet, il est important de ne pas considérer les problèmes identifiés dans l'AMDEC comme étant résolus sans mettre en place les actions correctives nécessaires. [104]

2.8.6.1 Pourquoi l'AMDEC maintenance?

L'AMDEC est une méthode qui permet de développer ou de mettre à jour un plan de maintenance pour un équipement spécifique, ou un ensemble d'équipements, en examinant attentivement sa criticité et ses modes de défaillance, ainsi que des facteurs tels que sa conception et sa redondance.

Pour mener à bien cette étude, il est nécessaire de recueillir et d'analyser l'historique de l'équipement en question. Les résultats de l'AMDEC peuvent être utilisés par différents services pour atteindre

divers objectifs, tels que l'amélioration des produits et des processus. De plus, l'étude de l'AMDEC peut conduire à des modifications de l'équipement.

Le critère central de l'AMDEC est la criticité des défaillances, et la définition d'un niveau de criticité tolérable est un élément clé de l'étude.

2.8.6.2 Différents types d'AMDEC

Types d'AMDEC	Rôle	Document de travail associé
AMDEC Fonctionnelle	Analyse des défaillances et de ses causes à l'étape de la conception.	Plan de construction - Brevet
AMDEC Produit	Analyse les demandes des clients en termes de fiabilité.	Plan de fiabilisation
AMDEC Process	Analyse des risques liés aux défaillances d'un produit.	Plan de surveillance- Contrôle qualité
AMDEC Moyen de Production	Analyse les risques liés aux défaillances de la chaîne de production.	Guide de maintenance
AMDEC Flux	Analyses les risques liés à l'approvisionnement, le temps de réaction et de correction et leurs coûts.	Plan de gestion des stocks- Procédure de sécurité

Table 2.1: Les types d' amdec

2.8.7 Objectif de l'AMDEC

L'AMDEC, dans le cadre d'une approche rigoureuse et inductive, a pour objectif d'identifier les défaillances susceptibles d'affecter le fonctionnement d'un système et de les classer en fonction de leur niveau de criticité afin de les maîtriser. En résultat, on obtient une liste exhaustive des dysfonctionnements potentiels associés à leur criticité, incluant la fréquence d'apparition, la gravité des effets et la probabilité de détection de la défaillance. De plus, des plans d'action sont élaborés pour réduire la criticité en agissant sur l'un des trois facteurs.

L'AMDEC est une technique qui permet d'examiner de manière critique la conception d'un système dans le but d'évaluer et de garantir sa sécurité de fonctionnement (sécurité, fiabilité, maintenabilité et disponibilité).

Elle permet d'identifier les points faibles d'un système et de proposer des solutions pour prévenir certaines défaillances. Elle favorise le dialogue entre les parties prenantes d'un projet, améliore la connaissance du système et permet principalement d'étudier les conséquences des défaillances afin de prendre les mesures adéquates. [105]

2.8.8 Outil méthode maintenance 7 : le kaizen

Le management Kaizen peut être considéré comme un système de gestion de qualité et d'amélioration continue, créé et testé pour la première fois chez Toyota au Japon. Contrairement à une approche axée sur les investissements financiers, Kaizen implique l'implication active de tous les maillons de la chaîne de production dans le processus d'amélioration continue.

En suivant une démarche d'amélioration continue, les cadres et les non-cadres sont encouragés à proposer des idées visant à améliorer la qualité et la productivité de manière continue. De petits changements sont ensuite mis en place chaque jour, permettant à l'entreprise industrielle d'optimiser sa gestion, sa productivité, ses produits et sa rentabilité.

Le Kaizen est considéré comme l'une des techniques de production à valeur ajoutée, combinée à la gestion de stocks, principalement en utilisant la méthode juste-à-temps et la cartographie de la chaîne de valeur.

Il convient de noter que Kaizen, Kanban et Scrum sont trois méthodes de résolution de problèmes qui ont permis aux grandes et petites entreprises d'améliorer leurs processus de production de manière significative. [106]

2.8.9 Outil méthode maintenance 8 : l'outil Méride

La méthode d'évaluation des risques industriels et des dysfonctionnements des équipements (MÉRIDE) est largement utilisée pour planifier les opérations de maintenance. Pour l'utiliser efficacement, il est important d'évaluer les défaillances potentielles et de réaliser une étude générale d'évaluation des risques.

En utilisant cette méthode, vous serez en mesure de déterminer le type de maintenance le plus approprié à mettre en place, tel que la maintenance préventive ou prédictive. Vous pourrez également mieux gérer vos stocks, décider des procédures à suivre et prendre des décisions éclairées pour améliorer la fiabilité de vos équipements.

L'utilisation de la méthode MÉRIDE vous permettra également de mieux comprendre les risques associés à vos activités industrielles, de prendre des mesures proactives pour réduire ces risques et d'améliorer la sécurité globale de votre environnement de travail. [107]

2.9 Rôle de la maintenance

De nos jours, la maintenance occupe une place de plus en plus importante dans la productivité et l'activité des entreprises. En effet, les tâches de maintenance ne se limitent plus uniquement à la réparation d'équipements en panne (maintenance corrective), mais englobent également l'anticipation des pannes et des dysfonctionnements (maintenance préventive) grâce aux avancées technologiques telles que les capteurs électroniques et les solutions de GMAO innovantes. Dans certains cas, la maintenance prévisionnelle ou prédictive permet même de prévoir les pannes et d'effectuer des interventions avant qu'elles ne surviennent.

L'objectif principal de la maintenance est de maintenir les équipements de production en état de fonctionnement optimal, tout en garantissant la sécurité et en réduisant les coûts de production. Ainsi, la maintenance peut contribuer à optimiser les processus de production et à générer des bénéfices pour l'entreprise.

De nos jours, les responsables et les techniciens de maintenance sont impliqués dans des projets plus complexes qui doivent prendre en compte de nombreux paramètres tels que les coûts, les délais, la

qualité, la sécurité et l'environnement. Leur rôle est donc plus vaste qu'auparavant, et ils doivent faire preuve de compétences en gestion de projet pour mener à bien leur mission. En somme, la maintenance joue un rôle crucial dans la réussite des entreprises modernes, en mettant en pratique le principe de prévention plutôt que de guérison. [108]

2.10 Elabortion un plan de maintenance efficace

Afin d'élaborer des plans de maintenance efficaces, il est essentiel de suivre cinq étapes clés. Tout d'abord, il est nécessaire de définir les opérations préventives à réaliser en fonction des recommandations du constructeur, de la réglementation et du comportement des équipements. Ensuite, il convient de définir les opérations de maintenance systématique en précisant leur périodicité, les moyens matériels et humains requis, le processus opératoire et l'ordre d'exécution. [109]

Il est également important de prévoir des opérations de maintenance conditionnelle et prévisionnelle en déterminant les paramètres à surveiller, les seuils d'alarmes à respecter, le mode d'acquisition des données et leur fréquence.

La quatrième étape consiste à élaborer un dossier de maintenance préventive qui regroupe l'ensemble des informations, plans d'action et interventions effectuées pour assurer la traçabilité des activités de maintenance.

Enfin, il est crucial de déterminer la charge de travail optimale en tenant compte des ressources disponibles, des priorités et des contraintes opérationnelles. Pour appliquer efficacement ces principes, il est recommandé de disposer d'outils pertinents tels que des logiciels de gestion de maintenance assistée par ordinateur (GMAO). En somme, en suivant ces cinq étapes et en utilisant des outils adaptés, il est possible de mettre en place des plans de maintenance efficaces pour garantir le bon fonctionnement des équipements. [110]

2.11 conclusion

ce chapitre a abordé divers aspects de la maintenance industrielle, mettant en évidence son importance cruciale dans les opérations industrielles. Nous avons examiné les différents types de maintenance, notamment préventive, corrective et prédictive, ainsi que les objectifs clés de la maintenance industrielle tels que la réduction des temps d'arrêt, l'amélioration de la disponibilité des équipements et l'optimisation des coûts.

Nous avons également discuté des principaux éléments de la gestion de la maintenance, tels que la planification, la programmation, l'exécution et le suivi des activités de maintenance. De plus, nous avons exploré les outils et les technologies utilisés dans la maintenance industrielle, tels que les systèmes de gestion de la maintenance assistée par ordinateur (GMAO) et les techniques de maintenance prédictive basées sur la surveillance des équipements.

Il est devenu évident que la maintenance industrielle joue un rôle essentiel dans la prolongation de la durée de vie utile des équipements, l'optimisation des performances, la réduction des coûts de maintenance et l'amélioration globale de la productivité de l'entreprise. En adoptant des pratiques de maintenance efficaces, les organisations peuvent minimiser les temps d'arrêt imprévus, améliorer la fiabilité des équipements et garantir un fonctionnement fluide de leurs processus de production.

Cependant, il est crucial de noter que la maintenance industrielle ne doit pas être considérée comme une activité ponctuelle, mais plutôt comme un processus continu et intégré dans la gestion globale de

l'entreprise. Une planification stratégique, une surveillance proactive des équipements et une formation adéquate du personnel sont des éléments clés pour garantir le succès de la maintenance industrielle.

Diagnostic des défauts d'un véhicule électrique

3.1 Introduction

dans ce chapitre Nous allons essayer de comprendre diagnostic des défauts d'un véhicule électrique. Avec la croissance de l'industrie automobile électrique, il est essentiel de comprendre comment identifier et résoudre les problèmes potentiels qui peuvent survenir dans le fonctionnement d'un véhicule électrique.

Le diagnostic des défauts joue un rôle crucial dans le maintien de la performance, de la fiabilité et de la sécurité des véhicules électriques. En raison de la complexité de ces véhicules, qui intègrent des systèmes électriques, électroniques et de gestion de l'énergie, il est primordial de disposer de méthodes et d'outils adéquats pour détecter et localiser les défauts éventuels.

Dans ce chapitre, nous explorerons les différentes techniques de diagnostic utilisées dans l'industrie automobile pour détecter et identifier les défauts des véhicules électriques. Nous discuterons des méthodes de diagnostic basées sur les signaux électriques, les systèmes embarqués et les outils de diagnostic avancés. Nous examinerons également les technologies émergentes telles que l'intelligence artificielle et l'apprentissage automatique, qui peuvent améliorer l'efficacité et la précision du diagnostic des défauts.

De plus, nous aborderons les principaux défauts couramment rencontrés dans les véhicules électriques, tels que les problèmes de batterie, les dysfonctionnements des systèmes de charge, les pannes des moteurs électriques, les erreurs de communication électronique, etc. Nous discuterons des causes possibles de ces défauts et des stratégies de dépannage appropriées.

En fin de compte, l'objectif de ce chapitre est de fournir aux professionnels de l'industrie automobile électrique les connaissances et les compétences nécessaires pour diagnostiquer efficacement les défauts des véhicules électriques, garantissant ainsi leur bon fonctionnement, leur sécurité et leur durabilité

3.2 Sûreté de fonctionnement

3.2.1 Définitions

De nos jours, la sûreté de fonctionnement est devenue un enjeu majeur pour les constructeurs dans divers secteurs tels que l'automobile, l'aéronautique, le nucléaire et la défense. L'évolution rapide de la technologie a conduit à une complexité croissante des systèmes tout en réduisant les coûts de conception et de fabrication. Dans cette optique, les fabricants se concentrent sur le critère de qualité afin de se démarquer sur le marché. Pour cela, ils doivent maîtriser les outils nécessaires pour maintenir

leur compétitivité et mettre en œuvre des actions d'amélioration à tous les niveaux. Ainsi, la sûreté de fonctionnement est devenue un élément essentiel à maîtriser lors de la conception de tout système [111]

Selon MORTUREUX , la sûreté de fonctionnement est définie comme un ensemble de moyens et de résultats produits par ces moyens. Pour un système donné, elle représente sa caractéristique principale qui permet de lui accorder une confiance justifiée. Cette confiance repose sur un ensemble de démarches et se manifeste par diverses caractéristiques, notamment la disponibilité et la sécurité.

VILLEMEUR considère la sûreté de fonctionnement comme l'aptitude d'une entité (organisation, système, produit ou moyen) à remplir une ou plusieurs fonctions requises dans des conditions données. Dans cette définition, la fonction du système désigne les performances fonctionnelles attendues. Il souligne également que ce concept englobe principalement la fiabilité, la disponibilité et la maintenabilité, ainsi que d'autres aptitudes telles que la durabilité, la testabilité, etc., ou des combinaisons de ces aptitudes. Dans son sens le plus large, cette notion fait référence à la science des défaillances et des pannes.

De son côté, LAPRIE affirme que la sûreté de fonctionnement est la propriété qui permet aux utilisateurs d'un système de placer une confiance justifiée dans le service qu'il fournit. Par conséquent, selon cette définition, la sûreté de fonctionnement traduit la confiance qu'on peut accorder à un système.

En résumé, la sûreté de fonctionnement est un enjeu clé , représentant la confiance justifiée qu'un système inspire. Elle englobe des caractéristiques telles que la fiabilité, la disponibilité, la maintenabilité, la sécurité, la durabilité, la testabilité, etc. Elle se réfère à la science des défaillances et des pannes, et permet aux utilisateurs de placer une confiance légitime dans le service fourni par un système [112].

3.2.2 Entraves à la sûreté de fonctionnement

Les obstacles à la sûreté de fonctionnement sont les circonstances indésirables et inattendues, les causes ou les résultats de l'absence de sûreté de fonctionnement. Parmi ces obstacles, on distingue la défaillance, la faute et l'erreur.

Selon Villemeur , une défaillance se produit lorsque l'aptitude d'une entité à remplir une fonction requise cesse. Cela se traduit par une perte de disponibilité de l'entité. Une défaillance peut être une altération temporaire ou permanente du service fourni, où le service délivré ne correspond pas au service attendu [113].

Une erreur représente une partie de l'état du système qui peut entraîner une défaillance. En d'autres termes, une défaillance se produit lorsque l'erreur atteint l'interface du service fourni et le modifie.

Une faute est considérée comme la cause avérée ou supposée d'une erreur. Ainsi, il existe une chaîne causale reliant la faute, l'erreur et la défaillance. En effet, la défaillance est la conséquence d'une erreur dont la cause est une faute.

En résumé, les obstacles à la sûreté de fonctionnement comprennent les défaillances, les erreurs et les fautes. Une défaillance se produit lorsque l'entité ne peut plus accomplir sa fonction requise, tandis qu'une erreur est susceptible de provoquer une défaillance. Une faute est la cause d'une erreur. Ces concepts sont essentiels pour comprendre les éléments qui peuvent compromettre la sûreté de fonctionnement d'un système [114].



Figure 3.1: Chaîne causale entre les entraves à la SdF

3.2.3 Aspects sur la sûreté de fonctionnement

La sûreté de fonctionnement englobe différents aspects qui sont essentiels pour garantir la fiabilité et la disponibilité d'un système. Voici les principaux aspects de la sûreté de fonctionnement :

1. Fiabilité : La fiabilité d'un système mesure sa capacité à fonctionner sans défaillance pendant une période donnée dans des conditions spécifiées. Elle concerne la probabilité que le système remplisse sa fonction requise sans défaillance [115].

2. Disponibilité : La disponibilité d'un système représente la capacité du système à être opérationnel et accessible lorsqu'il est requis. Elle prend en compte à la fois le temps de fonctionnement du système et le temps de récupération en cas de défaillance [116].

3. Maintenabilité : La maintenabilité concerne la facilité et l'efficacité avec lesquelles un système peut être réparé ou maintenu en cas de défaillance. Elle englobe les activités de diagnostic, de réparation et de remise en état du système [117].

4. Sécurité : La sécurité vise à prévenir les accidents, les dommages ou les blessures causés par le système. Elle concerne la conception et la mise en œuvre de mesures de protection pour minimiser les risques pour les utilisateurs, les opérateurs et l'environnement [118].

5. Durabilité : La durabilité se réfère à la capacité d'un système à maintenir ses performances et sa sûreté de fonctionnement dans le temps, malgré les contraintes et les conditions changeantes [119].

6. Testabilité : La testabilité est la mesure dans laquelle un système peut être testé pour détecter les erreurs ou les défaillances. Elle concerne la facilité avec laquelle les tests peuvent être conçus et exécutés pour évaluer la performance et la sûreté de fonctionnement du système.

Ces différents aspects de la sûreté de fonctionnement sont interdépendants et doivent être pris en compte dès la phase de conception d'un système afin d'assurer sa performance, sa fiabilité et sa sécurité tout au long de son cycle de vie [120].

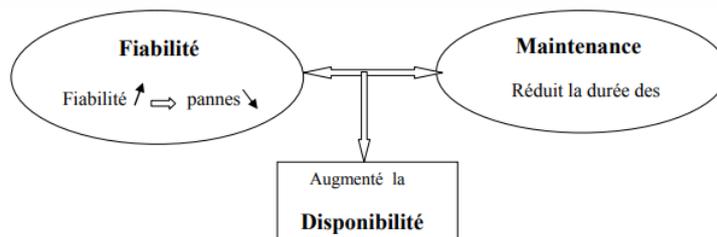


Figure 3.2: Relation entre fiabilité, maintenance et disponibilité

3.2.4 La sûreté de fonctionnement d'un véhicule électrique

La sûreté de fonctionnement d'un véhicule électrique englobe l'ensemble des caractéristiques et mesures prises pour assurer son bon fonctionnement, sa fiabilité et sa sécurité tout au long de son utilisation. Elle concerne notamment les composants électriques, électroniques et mécaniques du véhicule.

Pour garantir la sûreté de fonctionnement d'un véhicule électrique, plusieurs aspects sont pris en compte :

1. Fiabilité des composants : Les différents éléments du véhicule électrique, tels que la batterie, le moteur électrique, le système de gestion de l'énergie, doivent être conçus et fabriqués de manière fiable pour assurer leur bon fonctionnement sur une longue durée.

2. Sécurité électrique : Étant donné que le véhicule électrique utilise une haute tension électrique, des mesures de sécurité doivent être mises en place pour éviter tout risque d'électrocution ou d'incendie. Cela inclut la protection contre les courts-circuits, les surtensions et les surintensités.

3. Systèmes de surveillance et de diagnostic : Le véhicule électrique est équipé de capteurs et de systèmes de diagnostic avancés pour surveiller en temps réel le fonctionnement des différents composants. Cela permet de détecter rapidement toute anomalie ou défaillance et de prendre les mesures appropriées pour assurer la continuité de fonctionnement et la sécurité du véhicule.

4. Maintenance préventive : Des opérations régulières de maintenance et de vérification sont nécessaires pour s'assurer que tous les composants du véhicule électrique fonctionnent correctement. Cela comprend l'inspection et la maintenance de la batterie, le suivi de l'état de charge, la vérification des connexions électriques, etc [121].

5. Gestion thermique : Les véhicules électriques génèrent de la chaleur pendant leur fonctionnement, en particulier au niveau de la batterie et du moteur. Une bonne gestion thermique est essentielle pour éviter la surchauffe des composants et maintenir leur performance et leur durée de vie.

La sûreté de fonctionnement d'un véhicule électrique repose sur la fiabilité des composants, la sécurité électrique, les systèmes de surveillance et de diagnostic, la maintenance préventive et la gestion thermique. Toutes ces mesures sont mises en œuvre pour assurer le bon fonctionnement, la fiabilité et la sécurité du véhicule électrique, offrant ainsi une expérience de conduite sûre et fiable aux utilisateurs [122].

3.3 Diagnostic

3.3.1 définition

Selon la norme ISO 9000:2015, le diagnostic est défini comme étant le processus permettant de déterminer l'état actuel d'un système, d'un produit ou d'un processus, en utilisant des méthodes systématiques pour recueillir des données et effectuer des analyses. Le diagnostic vise à identifier les écarts par rapport aux critères de référence, à évaluer les performances, à détecter les problèmes potentiels et à formuler des recommandations pour améliorer la situation.

La norme ISO 9000:2015 définit le diagnostic comme une composante clé du processus de gestion de la qualité. Il est utilisé pour évaluer l'efficacité des processus, identifier les non-conformités, détecter les causes de problèmes ou de dysfonctionnements, et prendre des décisions éclairées pour améliorer les performances et atteindre les objectifs fixés. [123]

Le diagnostic peut être réalisé à différents niveaux, tels que le diagnostic d'un système de management de la qualité dans son ensemble, le diagnostic d'un processus spécifique, le diagnostic d'un produit ou service, etc. Il implique généralement l'utilisation de techniques d'analyse, d'observation, de collecte de données, d'évaluation des performances et de comparaison avec des critères établis.

L'objectif du diagnostic selon la norme ISO est d'obtenir une compréhension approfondie de la situation actuelle, de détecter les problèmes potentiels, d'identifier les opportunités d'amélioration et de formuler des recommandations pour des actions correctives ou préventives.

En résumé, le diagnostic selon la norme ISO est un processus systématique qui permet d'évaluer l'état actuel d'un système, d'un produit ou d'un processus, d'identifier les écarts et les problèmes, et de

formuler des recommandations en vue d'améliorer les performances et de garantir la conformité aux exigences de qualité. [124]

3.3.2 Type de diagnostic

il existe plusieurs types de diagnostics peuvent être utilisés pour évaluer la conformité et les performances du système de management de la qualité.

les types de diagnostic qui peuvent être appliqués :

3.3.2.1 Diagnostic de conformité :

Ce type de diagnostic vise à évaluer la conformité du système de management de la qualité aux exigences spécifiées dans la norme ISO 9001.

Il consiste à comparer les pratiques et les procédures mises en place avec les exigences définies dans la norme, afin de détecter les éventuels écarts [125].

3.3.2.2 Diagnostic des performances :

Ce type de diagnostic se concentre sur l'évaluation des performances du système de management de la qualité.

Il peut inclure des mesures et des indicateurs de performance pour évaluer l'efficacité des processus, la satisfaction des clients, les taux de non-conformité, les délais de livraison, etc [126].

3.3.2.3 Diagnostic des processus :

Ce type de diagnostic se concentre sur l'évaluation des processus clés du système de management de la qualité.

Il vise à identifier les forces et les faiblesses des processus, à détecter les problèmes potentiels et à proposer des améliorations pour optimiser les performances [126].

3.3.2.4 Diagnostic des risques :

Ce type de diagnostic se concentre sur l'évaluation des risques liés au système de management de la qualité.

Il vise à identifier les risques potentiels pouvant affecter la qualité des produits ou services, la satisfaction des clients ou le respect des exigences réglementaires, et à mettre en place des mesures préventives ou correctives appropriées [126].

3.3.2.5 Diagnostic des compétences :

Ce type de diagnostic se concentre sur l'évaluation des compétences et des connaissances du personnel impliqué dans le système de management de la qualité.

Il vise à identifier les besoins en formation, à évaluer les compétences existantes et à proposer des actions pour développer les compétences nécessaires.

Il convient de noter que ces types de diagnostic ne sont pas spécifiquement définis mais ils peuvent être utilisés comme approches courantes pour évaluer et améliorer les systèmes de management de la qualité conformément aux principes de la norme [127].

3.4 Relation entre la SDF et le diagnostic

La sûreté de fonctionnement et le diagnostic sont deux concepts étroitement liés dans la gestion des systèmes. Voici la relation entre ces deux aspects :

La sûreté de fonctionnement concerne la capacité d'un système à fonctionner de manière fiable et sans défaillance dans des conditions spécifiées. Elle englobe la fiabilité, la disponibilité, la maintenabilité, la sécurité et d'autres aspects liés à la performance et à la sécurité du système.

Le diagnostic, quant à lui, est le processus d'identification des défaillances ou des problèmes au sein d'un système. Il vise à détecter, localiser et évaluer les défaillances afin de prendre des mesures correctives appropriées. Le diagnostic peut être effectué de manière préventive, prédictive ou réactive, en fonction des besoins du système.

La relation entre la sûreté de fonctionnement et le diagnostic réside dans le fait que le diagnostic est un outil essentiel pour assurer la sûreté de fonctionnement d'un système. En détectant rapidement et avec précision les défaillances, le diagnostic permet de prendre des mesures correctives pour éviter les défaillances futures, minimiser les temps d'arrêt et maintenir la fiabilité et la disponibilité du système.

Le diagnostic contribue également à la maintenabilité en identifiant les problèmes de manière précoce et en facilitant les activités de réparation et de maintenance. Il aide à optimiser les ressources et les efforts nécessaires pour maintenir le système en bon état de fonctionnement.

En résumé, le diagnostic est un élément clé de la gestion de la sûreté de fonctionnement. Il permet de détecter les défaillances, de prendre des mesures correctives appropriées et d'assurer la fiabilité, la disponibilité et la sécurité du système. Le diagnostic préventif et prédictif peut contribuer à la prévention des défaillances et à l'amélioration continue de la sûreté de fonctionnement [128].

3.5 les défauts :

Les défauts ou les dysfonctionnements font référence aux problèmes ou aux erreurs qui peuvent survenir dans la fonction, les composants ou les systèmes d'un appareil ou d'un système. Dans le contexte des véhicules électriques, les défauts se rapportent spécifiquement aux problèmes ou aux anomalies qui peuvent affecter leur fonctionnement, leurs composants ou leurs systèmes. Ces défauts peuvent résulter de lacunes de conception, d'erreurs de fabrication, de dommages mécaniques, de dysfonctionnements électriques, de problèmes logiciels ou d'autres facteurs.

Lorsqu'il s'agit de véhicules électriques, les défauts peuvent entraîner des perturbations dans les performances du véhicule, tels que des pannes inattendues, des arrêts brusques, des problèmes de charge de la batterie, une réduction de l'autonomie, des erreurs d'affichage ou des dysfonctionnements des systèmes auxiliaires. En outre, ces défauts peuvent également présenter des risques pour la sécurité du conducteur et des passagers.

Il est donc crucial d'identifier et de rectifier rapidement les défauts des véhicules électriques afin de maintenir leur bon fonctionnement et d'assurer la sécurité des occupants. Cela nécessite des inspections régulières, une détection précoce des défauts, un diagnostic précis et la mise en place de mesures correctives appropriées. En prenant ces mesures, on peut garantir la fiabilité, la sécurité et les performances optimales des véhicules électriques [129].

3.6 Diagnostic d'un véhicule électrique

3.6.1 Définition

Pour détecter et réparer les défauts d'une voiture électrique, il est nécessaire d'établir un diagnostic correct et précis pour connaître l'emplacement et le type de dysfonctionnement. Avant le diagnostic, il faut déterminer la probabilité d'échec, puis essayer de choisir la méthode la plus appropriée et la plus correcte pour le type de diagnostic afin d'identifier avec précision les dommages et les dysfonctionnements et de se munir des outils nécessaires, puis diriger le bon plan de diagnostic. Pour y parvenir, il faut comprendre les principes de travail et comment vérifier les parties importantes de la voiture, notamment

- la batterie,
- le moteur électrique,
- les systèmes électroniques et les pièces connexes.

Ensuite, il est nécessaire de collecter des informations sur l'état de la voiture grâce à plusieurs examens. Une fois les informations nécessaires collectées, il est possible de choisir la méthode la plus adaptée au type de diagnostic. Il est également important de fournir les outils nécessaires pour le diagnostic.

Enfin, une fois les dommages et les pannes identifiés avec précision à partir des informations collectées, il est possible de diriger le bon plan de diagnostic et de réparation d'une voiture électrique. Cela peut inclure le remplacement de certaines pièces ou la réparation de circuits électriques endommagés, selon l'état du véhicule. [126]

3.6.2 Types de diagnostic d'un véhicule électrique

Les voitures électriques sont sujettes à de nombreux défauts, qui nécessitent un diagnostic correct et approprié. En effet, il existe des différences entre les voitures électriques et les voitures conventionnelles en termes de fonctionnement, de technologie et de dysfonctionnements, ce qui implique des diagnostics différents. Pour atteindre cet objectif, il est nécessaire de connaître d'abord les différents types de diagnostics disponibles.

3.6.2.1 Diagnostic logiciel

Ce type de diagnostic repose sur l'utilisation de programmes spécifiques à la voiture électrique. L'ordinateur est connecté à la voiture et le programme est utilisé pour analyser les données collectées à partir de nombreux capteurs présents dans la voiture [130].

3.6.2.2 Diagnostic manuel par des équipements

Des outils manuels spéciaux sont utilisés pour inspecter les différentes parties de la voiture électrique, telles que les batteries, les moteurs, les générateurs, les chargeurs, les fils, les connecteurs, et autres [131].

3.6.2.3 Diagnostic des pannes mécaniques

Dans ce type de diagnostic, les parties mécaniques de la voiture électrique sont examinées, telles que les pneus, les freins, le système de suspension, le système de propulsion, et autres.

3.6.2.4 Diagnostic des pannes électriques

Dans ce type de diagnostic, les parties électriques de la voiture électrique sont examinées, telles que les batteries, les moteurs, les chargeurs, les fils, les connecteurs, les circuits électroniques, et autres.

3.6.2.5 Diagnostic sonore

Ce type de diagnostic utilise le son pour détecter les pannes dans la voiture électrique, y compris l'utilisation d'écouteurs spéciaux pour inspecter les sons émis par la voiture lorsqu'elle est allumée et que ses différents équipements sont en marche [126].

3.6.3 Processus de diagnostic d'un véhicule électrique

1-Collecte d'informations

2-Analyse des codes d'erreur

3-Inspection visuelle et tests des composants

4-Interprétation des résultats

3.6.3.1 Collecte d'information

L'étape de collecte d'informations dans le processus de diagnostic d'un véhicule électrique revêt une importance primordiale. Elle consiste à recueillir des données pertinentes auprès du propriétaire du véhicule afin de comprendre les symptômes observés, les circonstances entourant le problème et d'autres informations qui pourraient être utiles pour le processus de diagnostic.

L'objectif de cette étape est de rassembler toutes les informations nécessaires pour établir un contexte complet et précis du problème rencontré par le véhicule électrique. Le technicien en diagnostic doit communiquer de manière efficace avec le propriétaire, en posant des questions spécifiques et en écoutant attentivement les réponses afin de recueillir des détails précis.

Cela peut inclure des informations sur les symptômes tels que des bruits anormaux, des vibrations, des pertes de puissance, des dysfonctionnements des systèmes électroniques, ou tout autre comportement inattendu observé par le propriétaire. Il est également important de recueillir des informations sur les événements précédant le problème, tels que des conditions de conduite particulières, des incidents ou des interventions récentes effectuées sur le véhicule.

La collecte d'informations doit être menée de manière méthodique et rigoureuse, en utilisant des techniques d'entretien structurées et en documentant soigneusement toutes les informations recueillies. Cela permet de garantir l'exactitude et la fiabilité des données obtenues, facilitant ainsi la phase suivante du processus de diagnostic.

En résumé, la collecte d'informations constitue le point de départ du processus de diagnostic d'un véhicule électrique, offrant au technicien une base solide pour comprendre le problème signalé et guider les étapes ultérieures du processus de résolution. Une approche méthodique et une communication efficace avec le propriétaire du véhicule sont essentielles pour garantir la collecte d'informations complètes et pertinentes [132].

3.6.3.2 Analyse des codes d'erreur

L'étape d'analyse des codes d'erreur dans le processus de diagnostic d'un véhicule électrique revêt une importance cruciale pour assurer une réparation précise et efficace. Elle consiste à examiner les codes

d'erreur générés par les modules électroniques du véhicule afin d'identifier les problèmes potentiels et d'orienter le technicien vers les domaines spécifiques nécessitant une attention particulière.

Pour effectuer cette analyse, le technicien utilise un outil de diagnostic avancé qui se connecte à l'unité de commande électronique du véhicule et récupère les codes d'erreur enregistrés. Ces codes sont des combinaisons alphanumériques qui fournissent des informations sur les systèmes ou les composants du véhicule qui ont signalé une défaillance ou un dysfonctionnement.

L'interprétation des codes d'erreur nécessite une connaissance approfondie des protocoles de communication et des normes de diagnostic utilisées dans le domaine des véhicules électriques. Le technicien fait référence à des bases de données spécialisées qui répertorient les codes d'erreur spécifiques à chaque constructeur automobile et fournissent des informations détaillées sur leur signification.

En analysant les codes d'erreur, le technicien peut déterminer la nature du problème rencontré. Par exemple, un code d'erreur lié au système de propulsion électrique peut indiquer un dysfonctionnement de la batterie, du moteur électrique ou des composants de gestion de puissance. De même, un code d'erreur concernant le système de freinage pourrait signaler une défaillance des capteurs, des actionneurs ou du système de régénération d'énergie.

Une fois les codes d'erreur analysés, le technicien peut établir un plan de diagnostic plus approfondi. Cela peut impliquer des tests supplémentaires, tels que des mesures de tension, des contrôles de continuité ou des vérifications de l'intégrité des signaux, pour valider les conclusions préliminaires et localiser précisément la source du problème.

En résumé, l'analyse des codes d'erreur d'un véhicule électrique est une étape essentielle du processus de diagnostic. Elle permet au technicien de cerner les problèmes potentiels en se basant sur les informations fournies par les modules électroniques du véhicule. Cette étape nécessite une expertise technique approfondie et l'utilisation d'outils de diagnostic spécialisés pour interpréter correctement les codes d'erreur et établir un plan de diagnostic précis. Une analyse précise des codes d'erreur contribue à une réparation efficace et permet de restaurer rapidement les performances et la fiabilité du véhicule électrique [133].

- **Prossesuce d'analyse des codes d'erreur**

Le processus de l'analyse des codes d'erreur d'un véhicule électrique comprend plusieurs étapes clés :

- 1. Récupération des codes d'erreur :**

le technicien utilise un outil de diagnostic approprié pour se connecter à l'unité de commande électronique du véhicule et récupérer les codes d'erreur enregistrés.

Cela peut se faire via une connexion physique ou sans fil, selon le système de diagnostic utilisé.

- 2. Interprétation des codes d'erreur :**

Une fois les codes d'erreur récupérés, le technicien les examine attentivement. Il se réfère à des bases de données, manuels techniques et autres ressources pour interpréter correctement les codes. Chaque constructeur automobile peut avoir son propre ensemble de codes d'erreur spécifiques, il est donc essentiel de disposer des informations précises sur leur signification.

- 3. Identification du système ou du composant concerné :**

Les codes d'erreur fournissent des indications sur les systèmes ou les composants qui ont signalé une défaillance ou un dysfonctionnement. Le technicien analyse les codes pour déterminer le système ou le composant spécifique impliqué dans le problème. Par exemple, il peut s'agir du système de propulsion électrique, du système de charge de la batterie, du système de gestion thermique, etc.

- 4. Vérification des informations complémentaires :**

Une fois le système ou le composant identifié, le technicien effectue des recherches supplémentaires pour obtenir des informations complémentaires sur le fonctionnement normal du système ou du

composant concerné. Cela peut inclure la consultation de manuels techniques, de schémas électriques, de spécifications du constructeur, etc.

5. Établissement d'un plan de diagnostic :

En se basant sur les informations recueillies, le technicien élabore un plan de diagnostic détaillé pour résoudre le problème. Cela peut impliquer des tests spécifiques, des vérifications de continuité, des mesures de tension, des inspections visuelles, des essais de fonctionnement, etc. L'objectif est d'isoler la cause sous-jacente du code d'erreur et de déterminer les actions correctives appropriées.

6. Rapport et documentation :

Pendant tout le processus d'analyse des codes d'erreur, le technicien prend des notes détaillées et documente chaque étape, y compris les codes d'erreur, les interprétations, les résultats des tests et les actions prises. Cela permet de créer un rapport de diagnostic complet et précis, qui peut être utilisé pour référence future, pour la communication avec le client ou pour des besoins de garantie.

Il est important de noter que la précision de l'analyse des codes d'erreur dépend de l'expérience, des connaissances techniques et de la compétence du technicien. Une analyse correcte des codes d'erreur est essentielle pour diagnostiquer avec précision les problèmes du véhicule électrique et prendre les mesures de réparation appropriées [134].

3.6.3.3 Inspection visuelle et des tests des composants

L'étape de l'inspection visuelle et des tests des composants dans le processus de diagnostic d'un véhicule électrique revêt une importance cruciale. Elle consiste à examiner visuellement les différents composants du véhicule et à effectuer des tests approfondis pour détecter d'éventuels problèmes ou défaillances.

L'inspection visuelle implique une observation minutieuse de tous les éléments visibles du véhicule, tels que les connexions électriques, les câbles, les faisceaux de câbles, les connecteurs, les capteurs et les actionneurs.

L'objectif est d'identifier les signes de dommages physiques, de corrosion, d'usure excessive, de mauvaises connexions ou de tout autre problème visible. Les techniciens peuvent également rechercher des anomalies, telles que des fils dénudés, des traces de fuite, des composants endommagés ou des éléments mal fixés.

Outre l'inspection visuelle, des tests sont effectués sur les composants spécifiques du véhicule électrique. Cela peut inclure des tests de continuité électrique pour vérifier l'intégrité des circuits électriques, des tests de résistance pour évaluer la résistance des capteurs et des actionneurs, des tests de tension pour mesurer les valeurs de tension des composants, et des tests de fonctionnement pour évaluer le bon fonctionnement des différents systèmes.

Des outils de mesure tels que les multimètres, les oscilloscopes et les testeurs de continuité sont utilisés pour effectuer ces tests. Les techniciens suivent des procédures spécifiques, utilisent des schémas électriques et des spécifications techniques pour interpréter les résultats des tests et comparer les valeurs mesurées avec les valeurs de référence.

L'objectif de cette étape est de détecter toute défaillance ou anomalie qui pourrait être à l'origine du problème signalé par le propriétaire du véhicule ou identifié lors de l'analyse des codes d'erreur. En identifiant les composants défectueux ou les problèmes de connexion, les techniciens peuvent prendre des mesures correctives appropriées, telles que le remplacement des composants défectueux, la réparation des connexions endommagées ou le réalignement des composants mal fixés.

Cette étape d'inspection visuelle et de tests des composants est essentielle pour un diagnostic précis et complet d'un véhicule électrique. Elle permet de compléter les informations obtenues à partir des

codes d'erreur et de confirmer ou d'identifier de nouveaux problèmes. Cela permet aux techniciens de proposer des solutions appropriées pour résoudre les problèmes et rétablir le bon fonctionnement du véhicule électrique [135].

3.6.3.4 Interprétation des résultats

L'étape d'interprétation des résultats dans le processus de diagnostic d'un véhicule électrique revêt une importance cruciale car elle permet de comprendre les informations obtenues à partir des différentes étapes précédentes et de tirer des conclusions concernant les problèmes et les solutions possibles.

L'interprétation des résultats commence par l'analyse des données collectées lors de l'inspection visuelle, des tests et des mesures effectués sur les différents composants du véhicule électrique. Les techniciens examinent les relevés, les valeurs mesurées, les codes d'erreur et les informations fournies par les outils de diagnostic pour identifier les éventuels problèmes ou dysfonctionnements.

Cette étape nécessite une connaissance approfondie des systèmes et des composants du véhicule électrique, ainsi que des spécifications du fabricant. Les techniciens comparent les résultats obtenus aux valeurs de référence, aux seuils acceptables ou aux normes établies par le fabricant pour déterminer si les composants fonctionnent correctement ou s'ils présentent des anomalies.

Dans certains cas, des interprétations plus avancées peuvent être nécessaires, telles que l'analyse de tendances ou la corrélation entre différents paramètres. Par exemple, si une valeur mesurée est en dehors des limites acceptables, les techniciens peuvent analyser d'autres paramètres connexes pour identifier la cause sous-jacente du problème.

L'interprétation des résultats nécessite également une expertise dans le domaine des véhicules électriques, y compris la compréhension des systèmes de gestion de l'énergie, des circuits électriques, des protocoles de communication et des logiciels embarqués. Les techniciens doivent être en mesure de déchiffrer les codes d'erreur, de comprendre les interactions entre les différents composants et de reconnaître les schémas de dysfonctionnement spécifiques aux véhicules électriques.

Une fois que les résultats ont été interprétés, les techniciens peuvent formuler des recommandations pour résoudre les problèmes identifiés. Cela peut inclure des actions correctives telles que le remplacement de composants défectueux, la réparation des connexions électriques, la mise à jour des logiciels ou l'ajustement des paramètres de configuration.

L'objectif final de l'interprétation des résultats est de diagnostiquer avec précision les problèmes du véhicule électrique et de proposer des solutions appropriées. Une interprétation précise et approfondie des résultats permet de gagner du temps et des ressources en ciblant directement les problèmes et en évitant des réparations inutiles.

En conclusion, l'étape d'interprétation des résultats dans le processus de diagnostic d'un véhicule électrique est essentielle pour comprendre les informations collectées et pour déterminer les problèmes sous-jacents. Elle nécessite une expertise approfondie dans le domaine des véhicules électriques, ainsi qu'une analyse approfondie des données et des résultats obtenus lors des étapes précédentes. L'interprétation précise des résultats permet de formuler des recommandations de réparation efficaces et de garantir un fonctionnement optimal du véhicule électrique [136].

3.7 Diagnostic des élément principale

3.7.1 batterie

Le diagnostic d'une batterie lithium-ion dans un véhicule électrique comprend plusieurs étapes, notamment:

Étape 1: Inspection visuelle - Le technicien examine la batterie et le système de gestion de batterie (BMS) pour détecter toute anomalie physique telle que des dommages physiques ou des fuites.

Étape 2: Test de tension - Le technicien effectue des tests de tension sur chaque cellule de la batterie pour s'assurer qu'elles sont équilibrées et qu'elles fournissent une tension nominale. [137]

Étape 3: Analyse de la capacité - Le technicien teste la capacité de la batterie en utilisant une charge et une décharge contrôlées. Cela aide à déterminer si la batterie a une capacité de stockage d'énergie suffisante.

Étape 4: Test de résistance interne - Le technicien mesure la résistance interne de la batterie, ce qui peut indiquer la santé de la batterie et sa capacité à délivrer de l'énergie.

Étape 5: Analyse de l'historique de charge - Le technicien examine l'historique de charge de la batterie pour détecter les erreurs de charge, les déséquilibres de cellules et les défauts de BMS.

Étape 6: Analyse des données de température - Le technicien examine les données de température de la batterie pour détecter les anomalies de température et les conditions environnementales extrêmes qui peuvent affecter la santé de la batterie.

Une fois toutes ces étapes terminées, le technicien peut fournir un rapport de diagnostic de la batterie lithium-ion, qui indique l'état de santé de la batterie et recommande des actions pour la réparation ou le remplacement si nécessaire. [138]

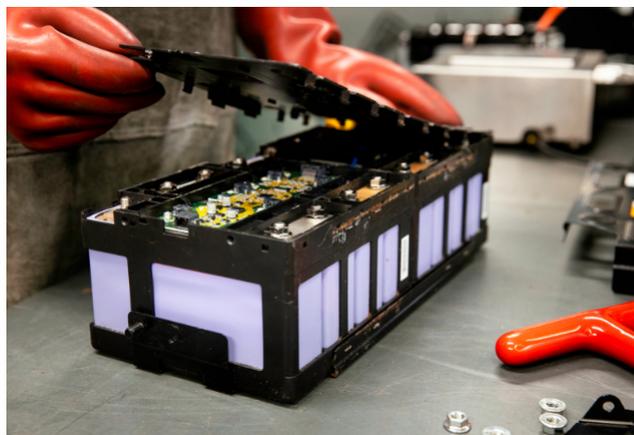


Figure 3.3: démontage d'une batterie lithium

remarque :

Le diagnostic d'une batterie au lithium dans une voiture électrique nécessite le respect d'un certain nombre de conditions de sécurité de base, parmi lesquelles:

1. Respectez les mesures de sécurité générales: portez des vêtements et des outils de protection appropriés,

évitent tout contact direct avec la batterie ou les pièces électriques exposées, éloignez les enfants et les animaux de la zone de travail.

3. Vérifiez périodiquement la batterie: la batterie doit être vérifiée avec des instruments de mesure appropriés pour confirmer l'état de charge, de décharge et de température.

5. Conformité aux lois et réglementations locales: vous devez vous conformer aux lois et réglementations locales relatives à l'élimination des piles et des matières dangereuses.

6. Évitez d'exposer la batterie à des températures élevées: il faut éviter d'exposer la batterie à des températures élevées ou de la stocker dans des endroits à températures élevées.

Vous devez respecter ces conditions afin de diagnostiquer en toute sécurité la batterie au lithium de la voiture électrique.



Figure 3.4: Un technicien vérifier une batterie

3.7.2 moteur électrique

Le moteur électrique d'une voiture électrique contient beaucoup moins de composants mécaniques que celui d'une voiture ordinaire.

les étapes pour diagnostiquer le moteur électrique de la voiture électrique :

1. Vérification des composants internes : tous les composants internes du moteur sont vérifiés à la recherche de tout dommage ou dysfonctionnement pouvant affecter les performances du moteur. Cela se fait en vérifiant l'axe de rotation et les autres parties mobiles telles que le rotor et le stator.

2. Mesure de la résistance : un appareil de mesure de la résistance peut être utilisé pour mesurer le niveau de résistance dans le moteur. Si la valeur de résistance est supérieure à la norme, cela peut indiquer un dommage au moteur. [38]

3. Vérification de l'accélération : l'accélération du moteur est vérifiée en faisant fonctionner le moteur et en observant le temps qu'il faut pour atteindre sa vitesse maximale. Si cette vitesse est inférieure à la norme attendue, cela peut indiquer un problème avec le moteur.

4. Vérification du bruit : le niveau de bruit produit par le moteur lorsqu'il est en marche est vérifié. Si le bruit est supérieur à la norme, cela peut indiquer un problème avec le moteur.

5. Test de simulation : la simulation informatique peut être utilisée pour tester le moteur et analyser toutes les données relatives à ses performances. Ce type de test peut être utilisé pour déterminer le niveau d'efficacité du moteur et trouver tout problème potentiel dans les composants. [139]

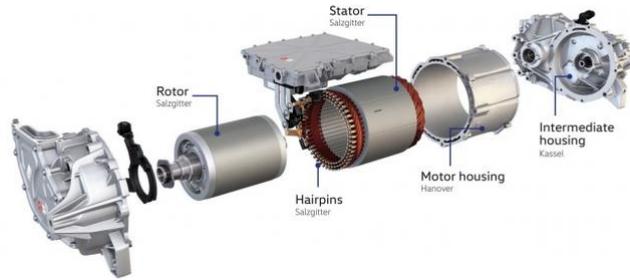


Figure 3.5: exemple de moteur électrique à rotor, celui de la Volkswagen ID.3.

3.7.3 Diagnostic de convertisseur

Le convertisseur électrique est vérifié en vérifiant la tension et le courant d'entrée et de sortie ainsi que les performances électriques du convertisseur à l'aide d'appareils de test spécialisés. La commande du convertisseur électrique et la distribution d'énergie dans la voiture peuvent également être vérifiées.

Les étapes pour diagnostiquer le convertisseur dans les voitures électriques:

1. Inspection visuelle: Le convertisseur doit être inspecté à la recherche de tout signe de dommage évident, tel que la rouille, la casse ou les éraflures. Il est également important de vérifier l'intégrité des connexions électriques.

2. Vérification de la tension d'entrée: La tension d'entrée dans le convertisseur doit être mesurée à l'aide d'un appareil de mesure. La tension d'entrée dans le convertisseur doit être mesurée avec précision.

3. Vérification de la tension de sortie: La tension de sortie du convertisseur doit être mesurée à l'aide d'un appareil de mesure. La tension de sortie du convertisseur doit être compatible avec les spécifications définies dans le manuel d'utilisation du véhicule.

4. Vérification du courant d'entrée: Le courant d'entrée dans le convertisseur doit être mesuré à l'aide d'un appareil de mesure. Le courant d'entrée dans le convertisseur doit être mesuré avec précision.

5. Vérification du courant de sortie: Le courant de sortie du convertisseur doit être mesuré à l'aide d'un appareil de mesure. Le courant de sortie du convertisseur doit être compatible avec les spécifications définies dans le manuel d'utilisation du véhicule.

6. Vérification du circuit électrique: Le circuit électrique doit être vérifié pour s'assurer qu'il n'y a pas de dommage aux fils, aux connexions ou à d'autres composants du circuit électrique.

7. Vérification de la résistance: La résistance du convertisseur doit être mesurée à l'aide d'un appareil de mesure de résistance. [140]

3.7.4 Diagnostic de système de chargement

Les composants de base du système de charge comprennent une source d'alimentation qui génère le courant électrique nécessaire pour charger la batterie, un contrôleur de charge qui surveille l'état de la batterie et ajuste la tension et le courant utilisés pour la charge afin d'éviter d'endommager la batterie, et les câbles de charge qui connectent le générateur électrique à la batterie. [141]

Pour diagnostiquer le système de charge, Nous allons suivre les étapes suivantes :

1- Vérification de l'alternateur: L'alternateur peut être vérifié à l'aide d'un testeur d'alternateur pour s'assurer qu'il génère le courant nécessaire pour charger la batterie.

2- Vérification de la courroie crantée: La courroie crantée qui relie l'alternateur au moteur doit être vérifiée pour s'assurer qu'elle fonctionne correctement et qu'elle n'est pas endommagée.

3- Vérification du régulateur de charge: Le régulateur de charge peut être vérifié à l'aide d'un testeur de charge pour s'assurer qu'il surveille correctement l'état de la batterie et ajuste correctement la tension et le courant utilisés pour la charge.

4- Vérification des câbles: Les câbles reliant l'alternateur à la batterie doivent être vérifiés pour s'assurer qu'ils fonctionnent correctement et qu'il n'y a pas de dommages ou d'usure.

5- Vérification de la diode de roue libre: La diode de roue libre présente dans le circuit de charge doit être vérifiée pour s'assurer qu'elle fonctionne correctement et qu'elle n'a pas d'obstacles ou de dommages.

Après avoir suivi ces étapes, toute anomalie dans le système de charge de la voiture peut être identifiée et les mesures nécessaires pour la réparer peuvent être prises [142].

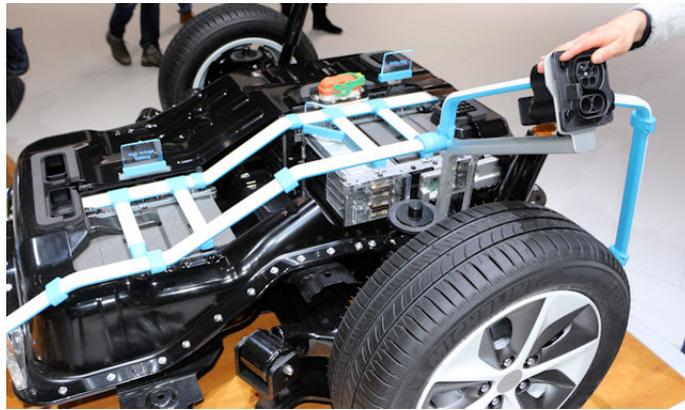


Figure 3.6: installation de chargement

3.7.5 Diagnostic du système de refroidissement

Pour diagnostiquer le système de refroidissement d'une voiture électrique, nous allons suivre les étapes suivantes :

1- Vérifier le niveau du liquide de refroidissement: vous devez vous assurer que le niveau de liquide de refroidissement dans le réservoir est correct. Vous pouvez vérifier cela à l'aide de l'indicateur de niveau de liquide de refroidissement dans la voiture.

2- Vérifier la température: vous pouvez vérifier la température du moteur à l'aide d'un thermomètre. Si la température est plus élevée que la normale, cela peut indiquer un problème dans le système de refroidissement. [143]

3- Vérifier les fuites: vous devez inspecter les tuyaux et les pinces du système de refroidissement pour vous assurer qu'il n'y a pas de fuites ou de dommages.

4- Vérifier le ventilateur: vous pouvez vérifier le ventilateur du système de refroidissement pour vous assurer qu'il fonctionne correctement et refroidit le moteur en cas de besoin.

5- Vérifier la pompe à eau: vous devez vérifier la pompe à eau du système de refroidissement pour vous assurer qu'elle fonctionne correctement et pompe le liquide de refroidissement dans le système de manière appropriée.

6- Vérifier le thermostat: vous devez vérifier le thermostat du système de refroidissement pour vous assurer qu'il fonctionne correctement et s'ouvre et se ferme au besoin pour réguler le débit de liquide de refroidissement.

Après avoir suivi ces étapes, vous pouvez identifier tout problème dans le système de refroidissement de la voiture électrique et prendre les mesures nécessaires pour le réparer [144].

3.7.6 Diagnostic de système de suspension

. Le système de suspension dans une voiture électrique est composé de plusieurs éléments qui doivent être diagnostiqués pour s'assurer qu'ils fonctionnent correctement et sans aucun problème.

pour diagnostiquer le système de suspension dans une voiture électrique Nous allons suivre les étapes suivantes :

1- Vérifier les angles avant et arrière : les angles avant et arrière de la voiture doivent être vérifiés pour s'assurer que la voiture est équilibrée et qu'il n'y a pas de différence de hauteur entre les essieux. Un niveau peut être utilisé pour vérifier l'équilibre de la voiture.

2- Vérifier les angles latéraux : les angles latéraux doivent être vérifiés pour s'assurer que la voiture est équilibrée des côtés droit et gauche.

3- Vérifier les pare-chocs : les pare-chocs doivent être vérifiés pour s'assurer de leur intégrité et qu'il n'y a pas de dommages.

4- Vérifier les bras et les liaisons : les bras et les liaisons dans le système de suspension doivent être vérifiés pour s'assurer qu'il n'y a pas de fissures ou d'usure.

5- Vérifier les ressorts : les ressorts dans le système de suspension doivent être vérifiés pour s'assurer qu'il n'y a pas de dommages ou de flexion anormale.

6- Vérifier les amortisseurs : les amortisseurs doivent être vérifiés pour s'assurer de leur intégrité et qu'il n'y a pas de dommages.

Après avoir suivi ces étapes, toute anomalie dans le système de suspension de la voiture électrique peut être identifiée et les mesures nécessaires peuvent être prises pour les réparer [145].



Figure 3.7: système de suspension TESLA M3

3.7.7 Diagnostic de Système de freinage

Les freins des voitures électriques diffèrent des freins des voitures traditionnelles car ils dépendent de la conversion de l'énergie cinétique du moteur en énergie électrique qui est ensuite stockée dans la batterie lorsque la pédale de frein est enfoncée. Par conséquent, les freins des voitures électriques offrent une expérience de freinage plus douce et plus économe en énergie que les freins traditionnels.

Le diagnostic des freins de la voiture électrique nécessite plusieurs étapes. Voici quelques éléments qui peuvent être vérifiés pour s'assurer que le système de freinage fonctionne correctement :

1. Vérifier la présence de liquide de frein : Il faut s'assurer que le niveau de liquide de frein dans le réservoir est dans la plage appropriée. Si le liquide de frein est insuffisant, cela peut indiquer une fuite dans le système.

2. Vérifier la présence des plaquettes de frein : Il faut s'assurer que les plaquettes de frein sont présentes et fonctionnent correctement. Cela peut être vérifié en vérifiant l'épaisseur des plaquettes et en s'assurant qu'elles contiennent toujours suffisamment de matériau de friction.

3. Vérifier les disques de frein : Il faut vérifier l'état des disques de frein et leur usure. L'usure des disques peut entraîner une diminution de l'efficacité des freins.

4. Vérifier le système électrique : Il faut vérifier les fils, les connecteurs et les capteurs électriques des freins pour s'assurer qu'il n'y a pas de dommages dans le système.

5. Tester le freinage : Il faut tester le freinage pour s'assurer qu'il fonctionne correctement. Cela se fait en démarrant le moteur et en faisant avancer la voiture avant d'appuyer sur les freins pour s'assurer que la voiture s'arrête correctement.

6. Vérifier les systèmes d'assistance de freinage : Il faut vérifier les systèmes d'assistance de freinage tels que le système de contrôle de traction pour s'assurer qu'il n'y a pas de défauts dans ces systèmes.

7. Vérifier le système ABS : Il faut vérifier le système antiblocage des roues ABS pour s'assurer qu'il n'y a pas de dommages dans ce système [146].

3.7.8 Diagnostic de système de sécurité

Le système de sécurité dans une voiture électrique est l'un des systèmes vitaux importants pour assurer la sécurité des passagers et du véhicule ainsi que les exigences de conduite sûre. Pour garantir le bon fonctionnement de ce système, il doit être diagnostiqué régulièrement et toute maintenance nécessaire doit être effectuée en cas de défauts.

les étapes de base pour diagnostiquer le système de sécurité dans une voiture électrique :

1- Vérification des coussins gonflables : Les coussins gonflables de la voiture doivent être vérifiés pour s'assurer qu'il n'y a pas de dommages ou de baisse de la pression de l'air. Un dispositif de diagnostic de défauts peut être utilisé pour identifier tout problème potentiel.

2- Vérification des systèmes de freinage : Les systèmes de freinage de la voiture doivent être vérifiés pour s'assurer qu'ils fonctionnent correctement, y compris le système de freinage antiblocage (ABS) et le système de régénération de l'énergie de freinage.

3- Vérification du système de surveillance de la stabilité : Le système de surveillance de la stabilité de la voiture doit être vérifié. Ce système aide à maintenir la voiture dans sa trajectoire et réduit le risque de glissement ou de dérapage, pour s'assurer de son bon fonctionnement.

4- Vérification du système d'avertissement de collision : Le système d'avertissement de collision doit être vérifié. Ce système avertit le conducteur de tout danger de collision pouvant survenir devant la voiture, pour s'assurer de son bon fonctionnement.

5- Vérification des capteurs de la voiture : Les capteurs de la voiture doivent être vérifiés pour s'assurer qu'il n'y a pas de dommages ou de baisse de précision. Un dispositif de diagnostic de défauts peut être utilisé pour identifier tout problème potentiel [147].

3.7.9 Diagnostic de système d'éclairage

Le système d'éclairage des voitures électriques est un élément important qui doit être diagnostiqué régulièrement pour assurer son bon fonctionnement.

les étapes de base pour diagnostiquer le système d'éclairage des voitures électriques :

- **Vérifier les ampoules** : toutes les ampoules de la voiture, y compris les feux avant, arrière, les clignotants, les feux stop, etc., doivent être vérifiées pour s'assurer qu'il n'y a pas de dommage ou de rupture de fils.

- **Vérifier les circuits électriques** : les circuits électriques liés au système d'éclairage doivent être vérifiés pour s'assurer qu'il n'y a pas de coupures ou de dommages aux fils ou aux connexions.

- **Vérifier les phares intelligents** : les phares intelligents, qui répondent aux conditions extérieures et ajustent automatiquement l'intensité et la direction de l'éclairage, doivent être vérifiés pour s'assurer qu'ils fonctionnent correctement.

- **Vérifier l'ordinateur de bord du système d'éclairage** : un appareil de diagnostic des erreurs peut être utilisé pour identifier tout problème potentiel avec l'ordinateur de bord du système d'éclairage et le corriger si nécessaire.

Le système d'éclairage doit être diagnostiqué régulièrement et toute maintenance nécessaire doit être effectuée pour assurer son bon fonctionnement, améliorer la visibilité du conducteur et garantir la sécurité du conducteur et des passagers [148].

3.8 Outils utiliser dans le diagnostic

Les voitures modernes fonctionnant à l'électricité constituent un système complexe comprenant une variété de composants électroniques et électriques différents.

Pour diagnostiquer et réparer les problèmes qui pourraient survenir dans ce système, vous avez besoin d'outils spécifiques aux voitures électriques.

3.8.1 Outils de mesure et de contrôle

- **Multimètre**

outil indispensable, et qui devez le maîtriser parfaitement pour mesurer des circuits électriques (contrôle des chutes de tensions, préférentiellement, et des résistances) [149].



Figure 3.8: Multimètre numérique

- **Ampèremètre**

C'est un dispositif de mesure utilisé pour mesurer le courant électrique dans un circuit électrique. Il se distingue par sa capacité à mesurer le courant avec précision et dans la plage électrique spécifiée [150].



Figure 3.9: Pince ampèremétrique

- **Testeur de continuité**

Un testeur de continuité est utilisé pour vérifier si un circuit électrique est ouvert (aucun courant ne passe) ou fermé (le courant circule librement). Il est utile pour vérifier les connexions électriques, les fusibles, les interrupteurs et les fils défectueux. Certains multimètres intègrent également une fonction de test de continuité.

Des marques populaires de testeurs de continuité sont contitest, Klein Tools et Extech [151].



Figure 3.10: Testeur de continuité CONTITEST 501

- **Testeur de circuit “Court-circuit ou circuit ouvert”**

permet de trouver facilement et de façon rapide un court-circuit ou un circuit ouvert. L'appareil élimine la nécessité de passer des heures à faire tout le déliement de câblage, d'ouvrir les conduits électriques et de détacher les panneaux de carrosserie [152].



Figure 3.11: Testeur de circuit

- **Testeur de batterie**

est un outil utilisé pour mesurer le niveau de charge de la batterie, son état de santé et sa capacité à alimenter le moteur.

Principe de fonctionnement de l'outil : Le testeur de batterie génère un courant électrique spécifique qui est connecté à la batterie. L'outil mesure la tension et le courant de la batterie, ainsi que sa capacité à faire fonctionner le moteur lorsque les appareils électriques du véhicule sont allumés.

Comment l'utiliser sur une voiture électrique : Les bornes négative et positive de la batterie sont placées dans les stations de test appropriées sur l'outil et l'outil est allumé. Les valeurs affichées à l'écran sont lues et comparées aux normes établies pour déterminer l'état de la batterie [153].



Figure 3.12: Testeur de batterie

3.8.2 Outils de diagnostic électronique

- **Interface de diagnostic OBD-II**

C'est un outil standard utilisé pour communiquer avec le système de gestion électronique du véhicule. Il permet de lire les codes d'erreur, de surveiller les paramètres en temps réel et d'accéder à certaines fonctionnalités du véhicule [154].



Figure 3.13: OBD2-interface

- **Caméra thermique**

C'est un outil qui utilise la thermographie infrarouge pour détecter les variations de température sur les composants électriques et électroniques. Il permet de repérer les surchauffes, les mauvais contacts ou les composants défectueux qui génèrent une chaleur anormale [155].



Figure 3.14: fluke TSi60

- **Scanners de diagnostic**

Un scanner de diagnostic avancé pour les véhicules électriques est un outil essentiel pour diagnostiquer et résoudre les problèmes liés à ces véhicules spécifiques.

- 1. Fonctionnalités supplémentaires :**

Contrairement à une simple interface OBD-II, un scanner de diagnostic avancé offre des fonctionnalités plus avancées.

Il peut accéder à des systèmes spécifiques du véhicule tels que le système de gestion du moteur électrique, le système de batterie, le système de charge, le système de contrôle du véhicule, etc.

Cela permet d'obtenir des informations plus détaillées sur ces systèmes et de diagnostiquer les problèmes de manière plus précise.

- 2. Informations détaillées :**

Le scanner de diagnostic avancé est capable de lire les codes d'erreur spécifiques aux véhicules électriques et de fournir des informations détaillées sur les problèmes détectés.

Il peut identifier les composants défectueux, les erreurs de communication entre les systèmes, les dysfonctionnements des capteurs, etc.

Ces informations précises aident les techniciens à cibler les réparations nécessaires.

3. Tests de composants avancés :

L'un des avantages clés d'un scanner de diagnostic avancé est sa capacité à effectuer des tests de composants avancés.

Il peut activer et désactiver certains composants électriques, surveiller les performances en temps réel, effectuer des tests de fonctionnement, etc.

Cela permet de vérifier la santé des composants tels que la batterie, les moteurs électriques, les capteurs, les actionneurs, etc., et de détecter les éventuels problèmes de manière plus approfondie.

4. Graphiques et données approfondies :

Certains scanners de diagnostic avancé sont capables de générer des graphiques en temps réel pour les paramètres électriques du véhicule.

Cela permet aux techniciens d'observer les variations et les tendances de ces paramètres, ce qui peut aider à identifier les problèmes intermittents ou les anomalies de performance.

De plus, ces scanners peuvent stocker et analyser des données historiques pour une évaluation plus approfondie.

Les marques populaires de scanners de diagnostic avancé pour les véhicules électriques incluent Snap-on, Bosch, Autel et Launch.



Figure 3.15: bosch kts 250

un scanner de diagnostic avancé pour les véhicules électriques est un outil essentiel pour diagnostiquer, analyser et résoudre les problèmes spécifiques à ces véhicules.

Il offre des fonctionnalités avancées, des informations détaillées sur les systèmes, des tests de composants approfondis et des données graphiques pour une analyse plus précise [156].



Figure 3.16: lunch C455

3.9 Centres de diagnostic au monde

Le diagnostic des voitures électriques nécessite des compétences et des connaissances spécifiques dans les technologies électriques et électroniques utilisées, ce qui le rend plus complexe par rapport aux voitures conventionnelles qui nécessitent moins de diagnostic et d'entretien. [157]

Il est donc important de présenter les principaux centres de diagnostic spécialisés dans les voitures électriques à travers le monde. Ces centres sont équipés d'outils et d'équipements de pointe pour diagnostiquer et entretenir efficacement les voitures électriques. Voici quelques-uns des centres les plus importants :

- **Tesla Service Centers**

Tesla est une entreprise leader dans l'industrie des voitures électriques, et elle possède des centres de service Tesla dans le monde entier qui offrent des services de maintenance et de diagnostic spécialisés pour leurs modèles.

- **Nissan EV Service Centers**

Nissan est également un acteur majeur dans l'industrie des voitures électriques, et elle propose des centres de service spécialisés pour diagnostiquer et entretenir ses voitures électriques, telles que la Nissan Leaf.

- **BMW i Service Centers**

BMW dispose d'un réseau de centres de service agréés pour la maintenance et le diagnostic de ses voitures électriques, y compris les modèles i3 et i8 [158].

- **Chevrolet Bolt EV Service Centers**

Chevrolet propose des centres de service spécialisés pour l'entretien de sa voiture électrique Bolt EV.

- **Hyundai/Kia Electric Service Centers**

Hyundai et Kia proposent des voitures électriques telles que la Hyundai Kona Electric et la Kia Niro Electric, et elles disposent de centres de service spécialisés pour diagnostiquer et entretenir ces voitures.

Ces centres de diagnostic spécialisés offrent des services professionnels pour garantir un entretien de qualité et des diagnostics précis des voitures électriques [159].

3.10 Importance de diagnostic pour les véhicules électrique

Le diagnostic des véhicules électriques revêt une importance considérable en raison de plusieurs raisons clés :

1. Détection précise des problèmes :

Les véhicules électriques sont dotés de systèmes complexes et de technologies avancées. Le diagnostic permet de détecter rapidement et avec précision les problèmes éventuels, tels que les dysfonctionnements du moteur électrique, des batteries ou des systèmes de charge.

Cela permet aux techniciens de localiser rapidement la source du problème et de prendre les mesures appropriées pour le résoudre [160].

2. Maintenance préventive :

Le diagnostic régulier des véhicules électriques permet d'identifier les problèmes potentiels avant qu'ils ne se transforment en pannes majeures. Cela permet de mettre en place des mesures de maintenance préventive pour éviter les défaillances coûteuses et prolonger la durée de vie des composants clés du véhicule, tels que les batteries [161].

3. Optimisation des performances :

Le diagnostic permet d'optimiser les performances des véhicules électriques en identifiant les réglages et les paramètres qui nécessitent des ajustements. Cela inclut la calibration des systèmes de propulsion électrique, l'optimisation de l'efficacité énergétique et la gestion intelligente de la consommation d'énergie [162].

4. Sécurité accrue :

Le diagnostic des véhicules électriques contribue à renforcer la sécurité des conducteurs, des passagers et des autres usagers de la route. En identifiant rapidement les problèmes de sécurité potentiels tels que les défauts du système de freinage ou les risques électriques, les techniciens peuvent prendre les mesures nécessaires pour garantir la sécurité de tous.

5. Réduction des coûts :

Un diagnostic efficace permet de réduire les coûts à long terme liés à la maintenance et aux réparations des véhicules électriques. En détectant rapidement les problèmes, il est possible d'éviter des dommages supplémentaires et des réparations plus coûteuses. De plus, l'optimisation des performances peut contribuer à réduire la consommation d'énergie et les coûts d'exploitation globaux du véhicule.

En résumé, le diagnostic des véhicules électriques est essentiel pour assurer leur bon fonctionnement, leur sécurité, leur durabilité et leur efficacité énergétique.

Il permet d'identifier et de résoudre rapidement les problèmes potentiels, d'optimiser les performances et de réduire les coûts à long terme [163].

3.11 Conclusion

le diagnostic des pannes dans les voitures électriques joue un rôle crucial dans le maintien de la santé et de la sécurité de la voiture, et évite des coûts de réparation élevés.

Il aide à identifier les problèmes tôt et à les réparer avant qu'ils ne s'aggravent, ce qui réduit les temps d'arrêt et les retards causés par les pannes.

Les programmes et les équipements modernes disponibles pour diagnostiquer les pannes dans les voitures électriques permettent de déterminer avec précision et rapidité les problèmes, ainsi que de contrôler le niveau optimal de performance.

De plus, ces outils permettent aux utilisateurs de surveiller les performances de la voiture et de diagnostiquer les pannes au bon moment.

Dans ce chapitre, nous avons défini le diagnostic et les termes associés et essayé de donner un aperçu du diagnostic des voitures électriques et de son importance

En fin de compte, le diagnostic des pannes dans les voitures électriques est une partie essentielle de la maintenance des voitures électriques, et il aide à atteindre des performances optimales et à maintenir la santé et la sécurité de la voiture.

Partie pratique

4.1 Introduction

Les véhicules électriques, tout comme les autres véhicules, peuvent rencontrer différents défauts, pannes et problèmes qui affectent leurs performances globales. Dans ce chapitre, nous allons aborder des méthodes de maintenance, telles que l'AMDEC (Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité), afin de limiter les défauts et les modes de défaillance, ainsi que d'évaluer leur impact. Nous chercherons à identifier les éléments les plus critiques des voitures électriques en analysant de manière globale les performances du véhicule et en étudiant l'effet de ces éléments sur celui-ci. Lorsqu'un élément critique est identifié, nous mettrons en place des tâches de maintenance préventive pour le système dans lequel cet élément est intégré. L'objectif est d'améliorer la fiabilité du véhicule.

4.2 Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité

4.2.1 Définition de l'AMDEC

L'AMDEC, qui signifie Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité, est un outil d'analyse puissant utilisé pour identifier de manière exhaustive les risques de défaillance d'un processus, d'un produit ou d'un équipement de production. Elle fait partie intégrante de la gestion des risques et vise à mettre en place des plans d'action préventifs pour éliminer ou réduire les risques liés à la sécurité des utilisateurs, à la qualité médiocre, à la perte de productivité et à la satisfaction insuffisante des clients.

L'AMDEC est une méthode inductive qui consiste à analyser systématiquement les causes et les effets des défaillances qui peuvent affecter les composants d'un système. Elle est caractérisée par son approche systématique, sa nature participative et son objectif préventif [164].

4.2.2 Principe de l'AMDEC

L'AMDEC est fondée sur une démarche inductive (compréhension du comportement) consistant à analyser les effets au niveau équipement puis sous de composants élémentaires.

Les modes de défaillance considérés peuvent être dé fonctionnel (constitué de quelques composants assurant une fonction élémentaire). Ils sont issus de normes, de bases de données ou résultent d'une

démarche déductive d'analyse de défaillance [165].

4.2.3 Mise en oeuvre

Utilisée pour la première fois dans les années 1960 en aéronautique, l'AMDEC ou FMECA en anglais (Failure Modes, Effects and Criticality Analysis) est reprise dans de très nombreux secteurs d'activités (automobile, ferroviaire... et plus récemment médical) L'AMDEC est normalisée (ECSS-Q-ST-30-02, NF X 60-510, CEI 812, MIL-STD- 1629A...).

Elle se présente sous la forme de tableaux à plusieurs colonnes dont le format peut être imposé. Plusieurs variantes de cette méthode existent (AMD, AMDE, AMDEC...). L'AMDEC se distingue de l'AMDE par une quantification de la criticité qui peut se déterminer par le produit des indices de fréquence, gravité et détection, par exemple.

Composant	Vanne N2HA Repère v01
Fonctions Etats	Vanne monostable "Faire" Etat de repos : fermée
Mode de défaillance	1-bloquée ouverte
Causes	Défaut mécanique clapet interne Commande électrique permanente
Effets	En mode contrôle Orbite : orbite erronée Risque de perte
Gravité	3
Mode de Détection	Lors de la visibilité sol suivante : orbite Erronée ou. pas de réception du satellite
Actions Recommandations	Privilégier un mode ctrl d'orbite en phase Visibilité sol Dans ce cas stopper la propulsion Prévoir une limitation temporelle sur la commande de la vanne
Observations	La redondance sur la commande électrique de la vanne n'est d'aucun secours pour ce mode de panne

Table 4.1: AMDEC d'un système de propulsion

Ainsi, l'exemple de tableau 2 représente une ligne, parmi plusieurs centaines, de l'AMDE d'un système de propulsion de satellite dans laquelle seule la classe de gravité a été renseignée.

Les différentes synthèses des tableaux d'analyse permettent d'identifier :

- les composants les plus critiques (et de les classer suivant leur gravité ou criticité).
- la liste de Points de Panne Unique (PPU) ou Single Point Failure (SPF) en anglais, dont la panne seule entraîne un événement redouté dans une architecture redondée,
- la liste des observables permettant de détecter une panne (signatures des anomalies),
- la liste des recommandations / actions qu'il est souhaitable de mener, etc [166].

4.2.4 Exploitation de l'AMDEC

La méthode AMDEC comporte :

4.2.4.1 Livret des points critiques

L'objectif de l'AMDEC était d'identifier les défaillances et/ou les composants critiques.

Lorsqu'on a analysé un système complexe avec des centaines de modes de défaillance, il peut être nécessaire de rassembler dans un document réduit les seuls points qui sont apparus critiques. Ce document est fréquemment désigné sous le nom de « livret des points critiques ».

En pratique, il peut être constitué par une simple compilation des rubriques de l'AMDEC relatives aux points désignés comme critiques [167].

4.2.4.2 Colonnes « modification » sur le tableau AMDEC

Il s'agit d'indiquer directement les modifications envisagées pour les points critiques, puis de procéder à une nouvelle évaluation de la criticité, en intégrant ces modifications, afin de vérifier qu'elles permettraient de rendre non critiques les points qui l'étaient initialement, ou au moins de diminuer leur criticité.

Cette façon de procéder peut amener à considérer que l'AMDEC va jusqu'à la recherche de solutions (voire jusqu'à la re-conception), or il existe une frontière entre l'AMDEC et cette phase ultérieure [168]

4.2.4.3 L'AMDEC et la (re)conception

Certaines modifications peuvent vraisemblablement être proposées par les personnes qui ont réalisé l'AMDE(C) mais il nous paraît logique de considérer que la recherche des solutions s'apparentera souvent à une phase de re-conception.

Même si les personnes qui réalisent l'AMDEC peuvent être aussi les concepteurs, il paraît indispensable de bien positionner l'AMDEC et la conception (ou la re-conception),

l'une par rapport à l'autre, en considérant l'AMDEC comme une méthode permettant de valider la conception ou d'identifier les points de conception non satisfaisants, selon le processus itératif décrit par la figure suivante

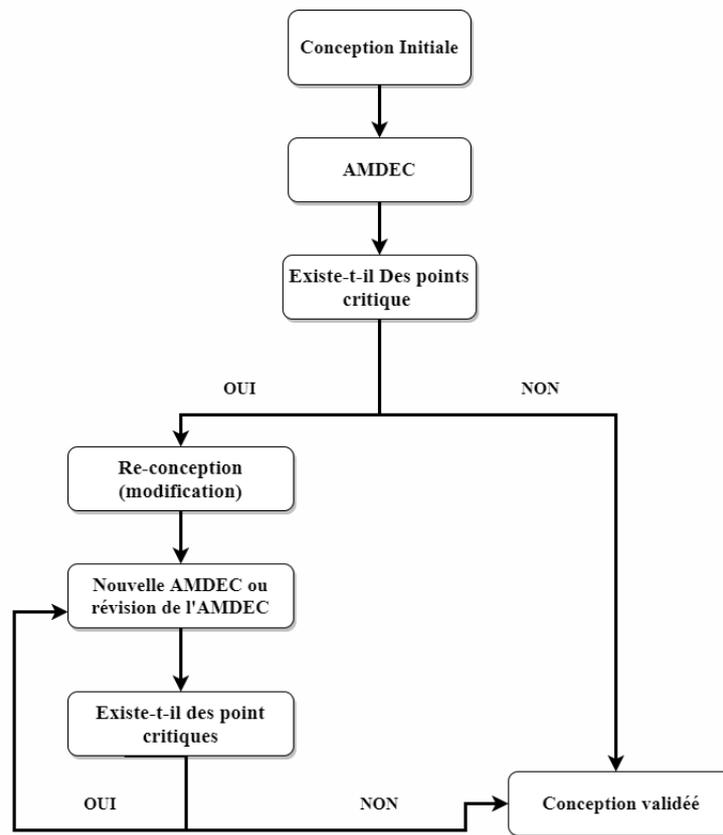


Figure 4.1: l'AMDEC et la re-conception

4.2.5 Différentes étapes de L'AMDEC

La méthode s'inscrit dans une démarche en huit étapes sont ;

4.2.5.1 Constituer l'équipe de travail

L'AMDEC s'appuie sur le travail de groupe, la réflexion collective et l'expérience des participants.

Il faut donc constituer un groupe de travail dont le choix des participants dépend de leur :

- expérience
- connaissance de la problématique
- niveau de technicité
- faculté à travailler en équipe Le groupe de travail doit être piloté par un modérateur chargé du suivi des résultats.

Une fois le groupe de travail constitué, présenter la méthodologie qui suivie pour l'analyse [169] .

4.2.5.2 Analyse fonctionnelle

Le but de l'analyse fonctionnelle est de déterminer d'une manière assez complète (les fonctions principales d'un produit, les fonctions contraintes et les fonctions élémentaires).

- Les fonctions principales : sont les fonctions pour lesquelles le système a été conçu, donc pour satisfaire les besoins de l'utilisateur.

- Les fonctions contraintes : répondent aux interrelations avec le milieu extérieur.
- Les fonctions élémentaires : assurent les fonctions principales, ce sont les fonctions des différents composants élémentaires du système.

Pour réaliser correctement l'analyse fonctionnelle il faut effectuer trois étapes principales :

Définir le besoin à satisfaire.

Le principe consiste à décrire le besoin et la façon dont il est satisfait et comment il risque de ne pas être satisfait.

Définir les fonctions qui correspondent au besoin. Etablir l'arbre fonctionnel afin de visualiser l'analyse fonctionnelle.

Très souvent les fonctions principales comportent des sous-fonctions ou résultent d'un ensemble des fonctions élémentaires.

D'où le besoin de l'arbre fonctionnel [170]

4.2.5.3 Etude qualitative des défaillances

Elle consiste à faire une identification des modes de défaillances, de leurs effets et des causes conduisant au dysfonctionnement d'un élément du système.

Ces trois notions sont liées par la relation suivante :

$$Cause \rightarrow Mode \rightarrow Effet \quad (4.1)$$

4.2.5.4 Etude quantitative

- **Acceptabilité, criticité, critères de jugement**

Une défaillance de « critique » si jugée à travers un ou plusieurs critères, elle nous apparait inacceptable. La notion d'acceptabilité est une notion relative, elle n'a de sens que dans un contexte donné.

Le jugement que nous pouvons porter sur une défaillance peut être :

1. Mono critère : dans ce cas, le critère est généralement la gravité des effets de la défaillance
2. bi-critère : dans ce cas, les deux critères sont généralement la gravité des effets de la défaillance et la probabilité de survenue de cette défaillance
3. Multi critère : dans ce cas, les critères sont, par exemple, la gravité des effets de la défaillance, la probabilité de survenue de la défaillance, la possibilité de détection de la défaillance ,etc

- **Echelles de jugement**

La criticité ou taux de criticité, est la combinaison de la sévérité d'un effet et de la fréquence de son apparition, ou d'autres attributs d'une défaillance, comme une mesure de la nécessité d'un traitement ou d'une atténuation.

L'analyse de la criticité des défaillances a été effectuée à l'aide des grilles proposées par l'outil AMDEC.

La criticité C, déduit par le produit des trois indices nominaux F, G et D [171].

$$C = F * G * D \quad (4.2)$$

C: Criticité (produit de l'occurrence, la gravité et la détection permettant la prise de décision quant à des actions correctives à mettre en oeuvre).

F : la Fréquence (probabilité qu'un défaut se réalise pour une cause donnée)

G : la Gravité

D : la Détection

4.2.5.5 La hiérarchisation

La hiérarchisation suivant l'échelle de criticité permet de décider des actions prioritaires. Elle permet de classer les modes de défaillances et d'organiser leur traitement par ordre d'importance .

4.2.5.6 Recherche des actions préventives/correctives

Après le classement des différents modes de défaillances potentielles d'après les indices de criticité, le groupe désigne les responsables de la recherche des actions préventives ou correctives

4.2.5.7 Suivi des actions prises et la réévaluation de criticité

Un nouvel indice de criticité est calculé de la même façon que lors de la première évaluation, en prenant en compte les actions prises.

Cette valeur du nouvel indice de criticité est parfois appelée risque résiduel et peut être illustrée sous forme du diagramme Pareto.

L'objectif de cette réévaluation est de déterminer l'impact et l'efficacité des actions prises. Le nouvel indice de criticité doit donc être inférieur au seuil de criticité

4.2.5.8 Présentation des résultats

Pour pouvoir effectuer et appliquer l'AMDEC, des tableaux conçus spécialement pour le système étudié et préparés en fonction des objectifs recherchés.

Ces tableaux sont habituellement disposés en forme de colonnes et contiennent, en général, les informations nécessaires pour réaliser l'étude.

4.2.6 DEMARCHE AMDEC

La réalisation d'une AMDEC comprend cinq étapes :

4.2.6.1 Initialisation

La phase d'initialisation comprend trois étapes qui sont :

- Définition du système et des objectifs à atteindre
- Constitution du groupe de travail
- Mise au point de supports de l'étude

4.2.6.2 Analyse fonctionnelle « AF »

L'analyse fonctionnelle a pour but d'identifier la fonction de chaque élément étudié pour prévoir les modes de défaillance possibles

4.2.6.3 Analyse des défaillances

A partir de l'analyse fonctionnelle, la démarche AMDEC consiste en une recherche :

1. Des modes de défaillance ;
2. Des effets de défaillance ;
3. Des causes de défaillance ;
4. La criticité de défaillance ;

- **Défaillance**

C'est le résultat d'un non fonctionnement, ou d'un non satisfaction aux spécifications, généré par une pièce ou un ensemble.

La défaillance peut être :

1. Complète :il s'agit de la cessation de la réalisation de la fonction d'un dispositif.
2. Partielle : il s'agit de l'altération de la réalisation de la fonction d'un dispositif.

- **Cause de défaillance**

C'est l'événement à l'origine du mode de défaillance, la ou les causes sont à rechercher à la conception, la construction, l'installation, l'utilisation et la maintenance de l'équipement.

Remarque

plusieurs causes peuvent être associées à un même mode de défaillance, ainsi une même cause peut provoquer plusieurs modes de défaillance.

- **Effet constaté**

C'est la conséquence de la défaillance sur laquelle on distingue deux types :

1. L'effet global :c'est la conséquence de défaillance sur la mission du système et sa sécurité.
2. L'effet local : c'est la conséquence de défaillance au niveau du sous-système étudié.

- **Détection**

Ce sont les symptômes (anomalies, indicateurs,...) observés, détectés qui permettent de repérer assez tôt l'évolution d'un mécanisme défaillant.

4.2.6.4 Cotation de criticité

Les modalités de cette cotation sont à définir lors de la mise au point des supports de l'étude, en fonction de l'étude et des objectifs.

L'indice de criticité C , aussi appelé nombre de priorité de risque (NPR) ou encore Indice de Priorité de Risque (IPR), est le résultat du produit de La fréquence, de la détection et de la gravité qui caractérise le niveau de fiabilité du système analysé.

$$C = G * F * D \quad (4.3)$$

• Indice F

Relatif à la fréquence d'apparition de la défaillance, cette fréquence exprime la probabilité combinée d'apparition du mode de défaillance par l'apparition de la cause de la défaillance.

La fréquence F allant de 1 jusqu'à 4 (Tableau 2)

Niveau de	fréquence : F	Définition des niveaux
Fréquence très faible	1	Défaillance rare : Moins d'une défaillance par année
Fréquence faible	2	Défaillance possible :Moins d'une défaillance par trimestre
Fréquence moyenne	3	Défaillance fréquente : Moins d'une défaillance par semaine
Fréquence forte	4	Défaillance très fréquente: plusieurs défaillances par semaine

Table 4.2: Grille de cotation de la fréquence.

• Indice D

Relatif à la possibilité de détecter la défaillance (le couple : Mode-Cause de défaillance) avant qu'elle ne produise l'effet.

La détection D est évaluée de 1 pour une défaillance détectable, à 4 pour une défaillance indétectable (Tableau 3)

Niveau de	détection D	Définitions
Détection évidente	1	Défaillance détectable à 100 % : -Détection à coup sûr de la cause de la défaillance. - Signe avant coureur évidant d'une dégradation.
Détection possible	2	Défaillance détectable: -Signe avant coureur de la défaillance facilement détectable mais nécessitant une action particulière de l'opérateur (visite, contrôle possible visuel,.).
Détection improbable	3	Défaillance détectable: -Signe avant coureur de la défaillance difficilement détectable, peu exploitable au nécessitant une action au des moyens complexe (démontage, appareillage,.).
Détection impossible	4	Défaillance détectable: -Aucun signe avant coureur de la défaillance.

Table 4.3: Grille de cotation de la probabilité de non détection .

• Indice G

Relatif aux conséquences provoquées par l'apparition du mode de défaillance en termes de

1. Qualité des pièces produites.
2. Sécurité des hommes ou des biens.
3. Temps d'intervention qui correspond au temps actif de maintenance corrective (diagnostic+réparation ou échange+remise en service).

La gravité G est le plus souvent cotée de 1 jusqu'à 5 (Tableau .4)

Niveau de gravité : G	Définition des niveaux
Gravité mineure	1 Défaillance mineure : -arrêt de production inférieur à 2 mn, -aucune dégradation notable du matériel
Gravité significative	2 Défaillance significative : -arrêt de production de 2 à 20 mn, ou repos possible d'intervention -remise d'état de courte durée ou une petite réparation sur place nécessaire. -Déclassement du produit
Gravité moyenne	3 Défaillance moyenne : -arrêt de production de 20 mn à 1 heure, -changement du matériel défectueux nécessaire. -Retouche du produit nécessaire ou rebat (non qualité a la production
Gravité majeure	4 Défaillance majeure : -arrêt de production de 1 à 2 heures, -intervention importante sur sous ensemble, -production de pièces non conformes non détectées
Gravité catastrophique	5 Défaillance catastrophique : -arrêt de production supérieur à 2 heures, -intervention nécessitent des moyens coûteux. -problème de sécurité du personnel ou l'environnement

Table 4.4: Grille de cotation de la gravité

4.2.6.5 Actions menées

Les actions menées consistent à :

1. Classer les problèmes rencontrés ;
2. Proposer l'amélioration ;
3. Calcul de la nouvelle criticité.

- **Classement des problèmes rencontrés**

Les actions menées sont décidées par le groupe de travail pour pouvoir éliminer tous points critiques.

À partir de la valeur de la criticité, on peut classer les problèmes par ordre décroissant et les répartir en différentes classes (Tableau 5).

Valeur de la criticité	Politique de la maintenance
$C < 16$	Mise sous correctif.
$16 \leq C < 32$	Mise sous préventif à la fréquence faible.
$32 \leq C < 36$	Mise sous préventif à la fréquence élevée.
$36 \leq C < 48$	Recherche d'amélioration.
$48 \leq C < 64$	Reprendre la conception.

Table 4.5: Tableau de la criticité

4.3 Analyse du véhicule électrique par la méthode AMDEC

Pour pouvoir connaître les pannes les plus critique et pénalisation de notre système, nous avons mené une étude quantitative par la méthode AMDEC. A la fin de cette analyse nous aurons une image sur l'ensemble des pannes et défauts ce qui nous permet de concentrer sur les panes critiques. Le tableau suivant résumé notre étude.

Elément	Fonction	Modèle défaillance	Cause de la défaillance	Effet de la défaillance	Détection	Criticité				Action corrective
						F	G	D	C	
Batterie de servitude	Transmettre le courant	Ne charge plus	Usure cause Cycles de recharge	Péret de l'allumage électrique a bord	Pas de lumière	1	2	4	8	Remplacement de la BT
Batterie d'attraction HT/400V	Transmettre le courant au moteur d'attraction	Ne charge plus	Usure cause Cycles de recharge	Arrêt du véhicule	Pas d'attraction	1	3	4	12	Remplacement de la BT
Circuit de recharge	Assure la liaison entre la batteries et le chargeur	Absence de la continuité électrique	Usure des câbles électriques	Pas d'allumage a bord	Visuel	1	1	1	1	Remplacement du câblage électrique
Convertisseur, Onduleur DC/DC	Assure la liaison entre la batteries et le chargeur	Vieillessement des composants électrique	Réchauffement thermique	Pas de recharge sur la BT de servitude	Echauffement ou sans	1	1	3	3	Remplacement de la carte électronique
Chargeur redresseur AC/DC	Recharge la BT d'attraction	Vieillessement des composants électrique.	Réchauffement thermique	Pas de recharge sur la BT d'attraction	Echauffement ou sans	1	1	3	3	Remplacement de la carte électronique
Moteur Electrique	Source de la puissance du véhicule	Mauvaise attraction	Arrêt du véhicule	Usure Charbons du rotor	Moteur ne tourne plus	1	4	3	12	Changement des charbons
Groupe de transmission	Liaison entre le moteur et les roues	Désalignement	Mauvaise attraction et avec bruit	Boulons desserrés	L'organe récepteur ne tourne pas	1	4	2	8	Contrôle périodique
Calculateur Moteur	Gère électroniquement le moteur/allumage et la sécurité	Mauvaise fonctionement du moteur	le vehicule ne demare pas	Réchauffement thermique	Pas d'allumage	1	4	3	12	Remplacement du Calculateur
Pompe de freins	Permet la distribution d'huile vers le cylindre de frein	Fuite, ou frein ne fonctionne pas	Arrêt de fonctionnement des freins	Perte d'huile, Durte abimée	Visuelle	1	1	1	1	Contrôle périodique
Capteur de pression pneumatique	Mesure la pression des pneus	Surconsommation énergétique	Perte de la performance	Usure et température	Visuelle	1	4	2	8	Remplacement
Capteur de pédale d'accélérateur	Détecte la position de pedale	Anomalie, vitesse moteur	Perte de la performance	Usure et température	Instrument	1	4	3	12	Remplacement

Table 4.6: AMDEC du cas d'application

Par simulation on trouve les résultats suivants [172]:

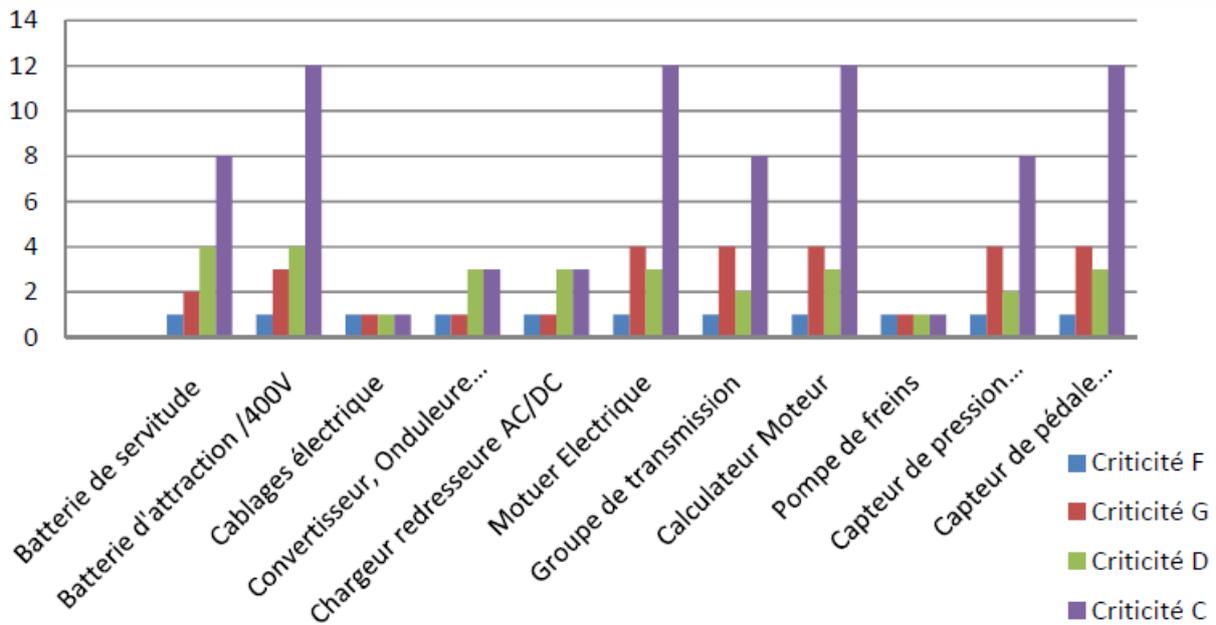


Figure 4.2: Histogramme d'AMDEC

D'après le résultat obtenu du tableau de l'AMDEC, on trouve que (voir Figure 2) :

- Batterie d'attraction HT/400V
- Moteur Electrique
- Calculateur Moteur
- Capteur de pédale d'accélérateur

Ont la criticité la plus élevé, donc à partir des résultats trouvé auparavant, on construit l'arbre de défaillance réduite suivante :

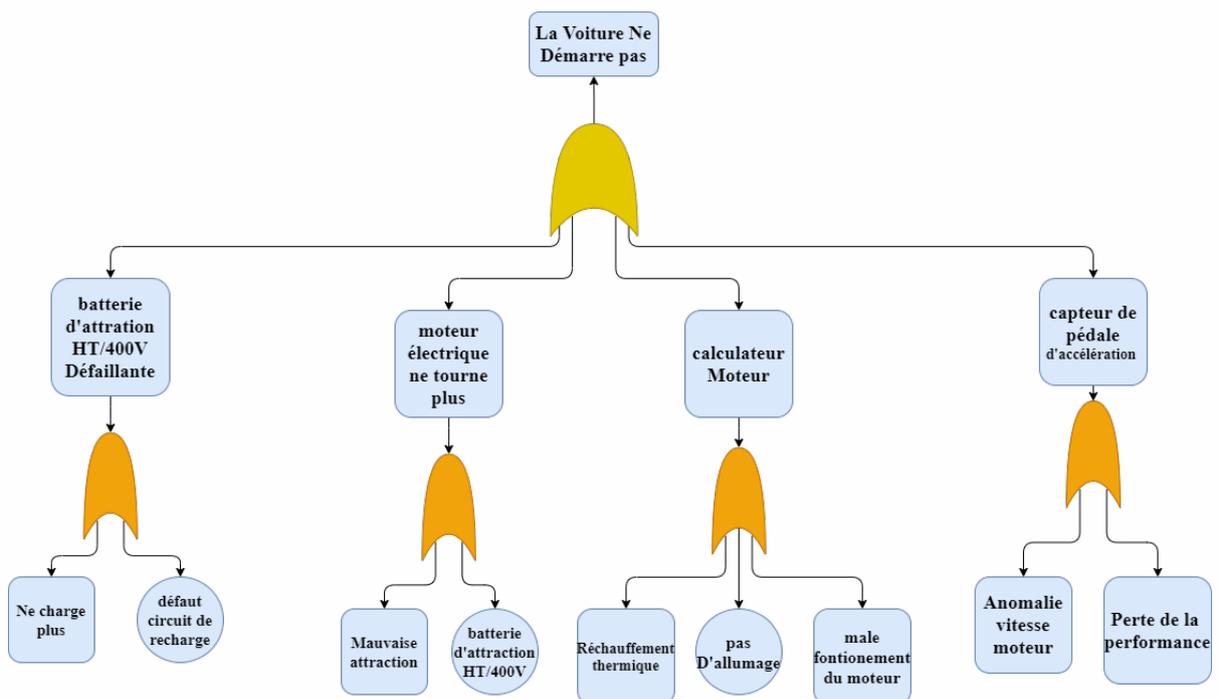


Figure 4.3: Réduction de l'Arbre de défaillance.

Donc si la batterie d'attraction et défaillante et avec une connaissance sur la nature de la défaillance des autres composants du système, il est possible d'utiliser la notion d'arbres de défaillances et les outils associés pour gérer la performance de chaque composant ainsi que l'efficacité du système (VE).

Par simulation avec une durée de vie 50000 h ; on trouve les résultats ci-dessous :

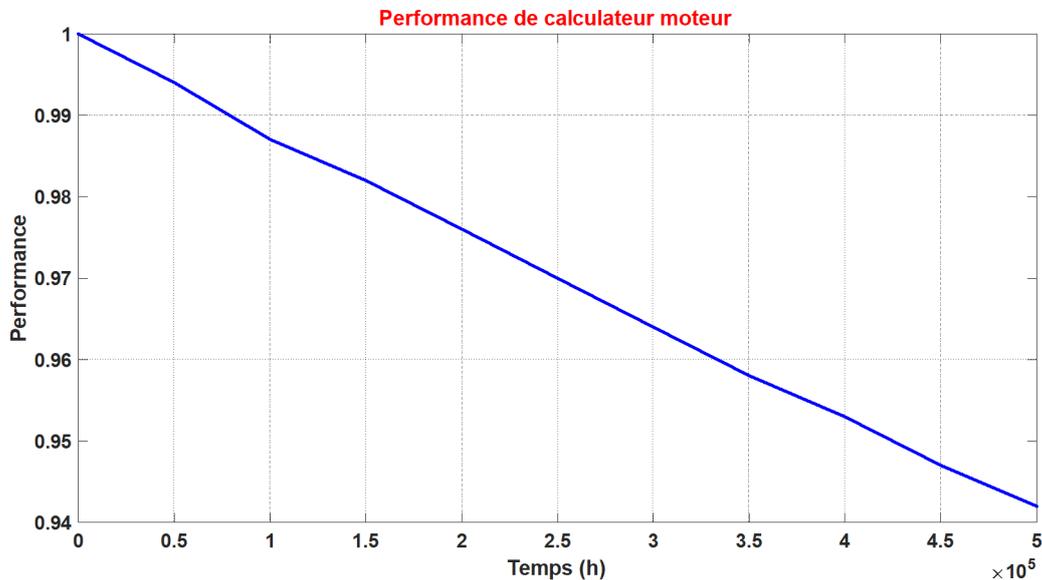


Figure 4.4: Performance calculateur moteur.

1-La figure de simulation montre que le calculateur moteur affiche de bonnes performances. Le calculateur moteur joue un rôle clé dans l'optimisation des performances globales du système.

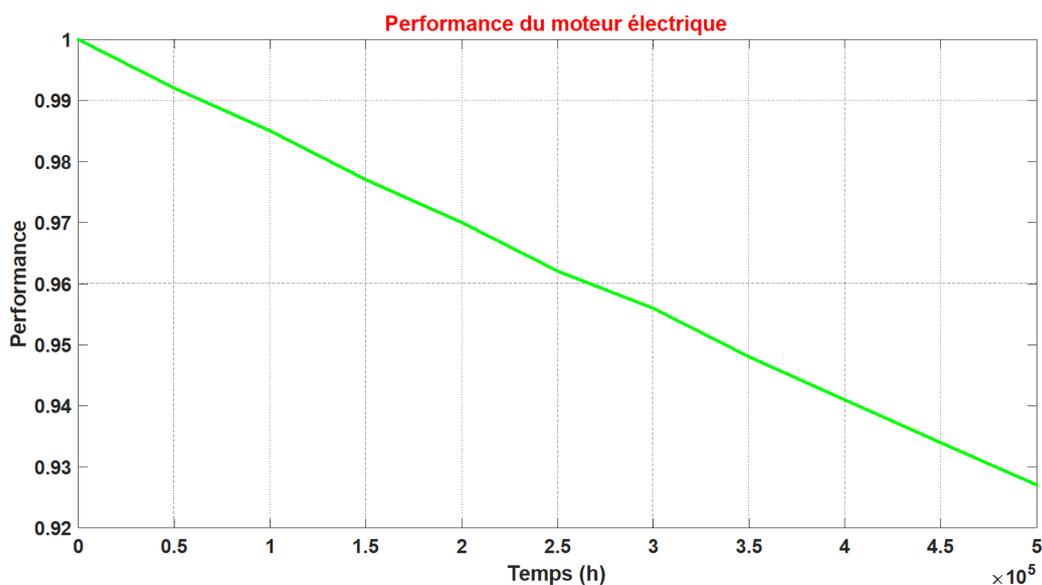


Figure 4.5: Performance moteur électrique.

2-La figure de simulation indique que le moteur électrique est également performant. Le moteur électrique convertit efficacement l'énergie électrique en énergie mécanique pour propulser le véhicule, ce qui se traduit par de bonnes performances en termes de puissance, de couple et d'accélération.

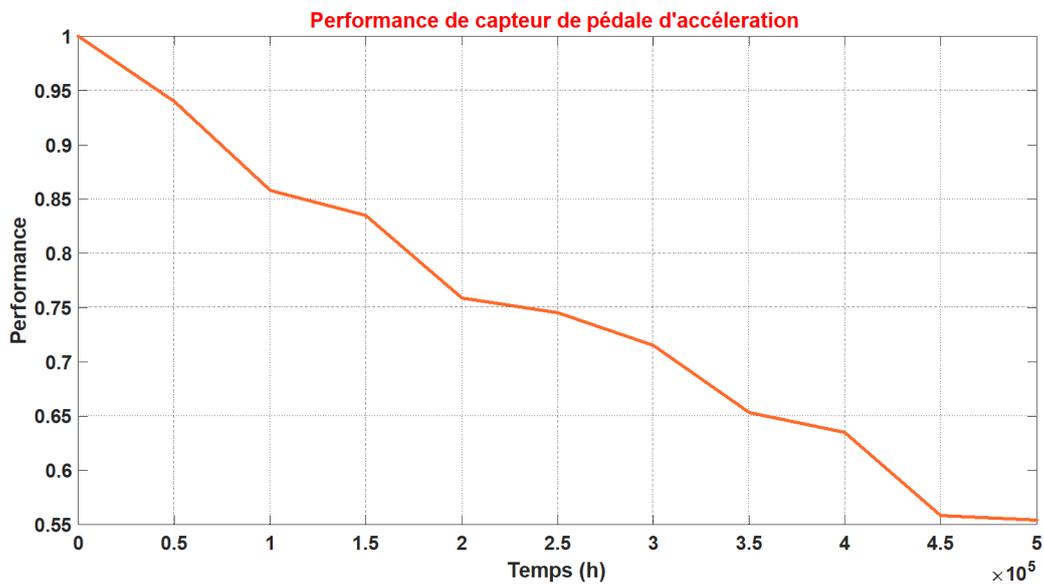


Figure 4.6: Performance capteur de pédale d'accélération.

3-La figure de simulation suggère que le capteur de pédale d'accélération présente des performances inférieures aux autres composants du système. Cela peut être interprété comme une détection moins précise des mouvements de la pédale d'accélération, ce qui peut entraîner des retards ou des variations dans les commandes transmises au calculateur moteur. Une dégradation des performances du capteur de pédale d'accélération peut influencer négativement la réponse globale du véhicule.

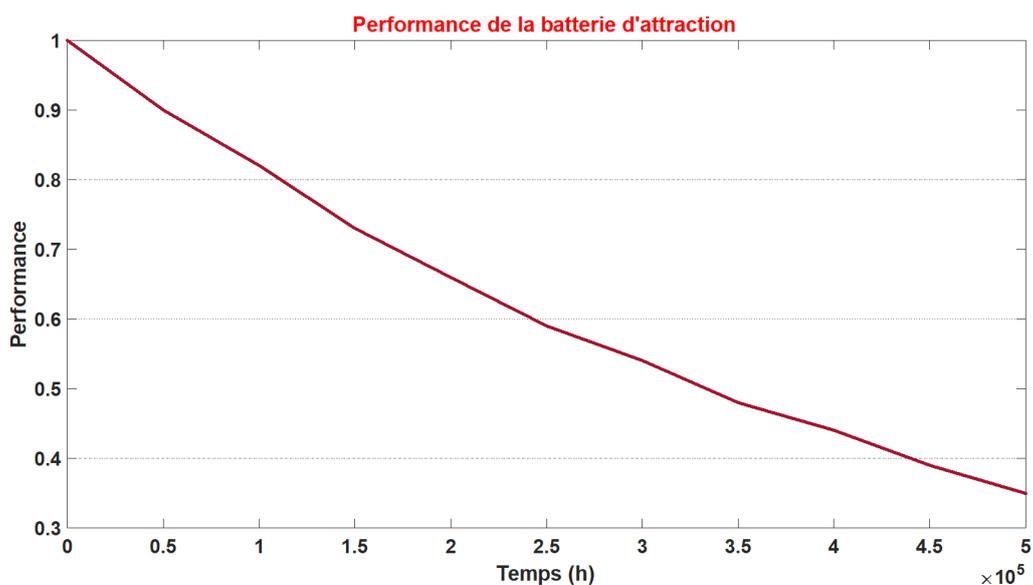


Figure 4.7: Performance batterie d'attraction.

D'après la simulation, on remarque bien que le calculateur moteur et le moteur électrique sont plus performants que le capteur de pédale d'accélération et la batterie d'attraction.

Donc on remarque bien que la performance du système se dégrade à cause de la dégradation de la batterie d'attraction (voir figure ci-dessous Figure 8).

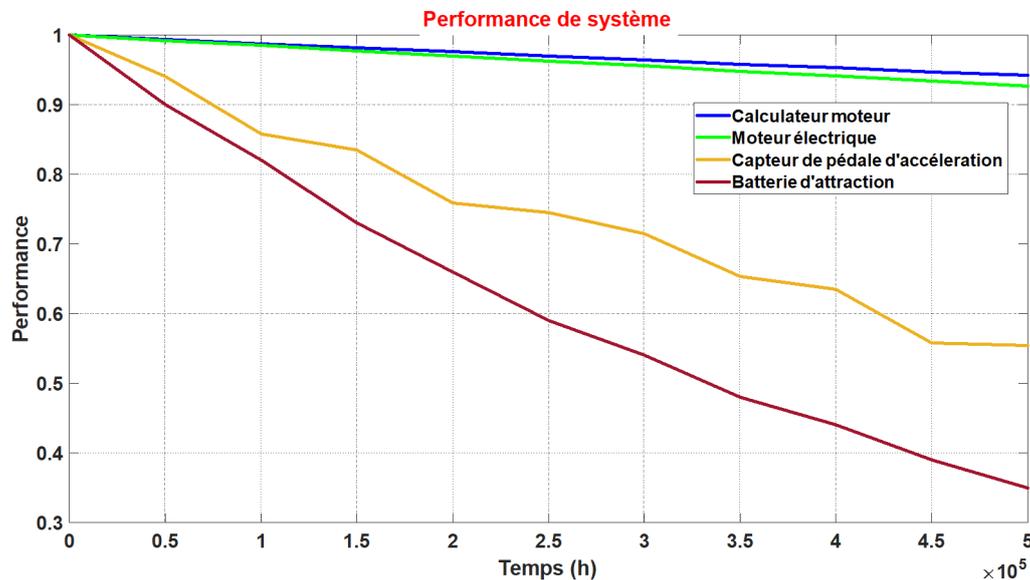


Figure 4.8: Performance de système.

4-Selon les résultats de la simulation, la batterie de traction montre une dégradation de ses performances. Cela peut être interprété par une capacité réduite de stockage et de délivrance de l'énergie électrique nécessaire au moteur électrique. Une batterie de traction dégradée peut entraîner une diminution de l'autonomie du véhicule, une puissance réduite ou des problèmes de charge. Cela peut avoir un impact négatif sur les performances globales du système électrique [173].

danc La figure 8 montre que les anomalies de la défaillance de la batterie d'attraction conduisent à des pertes d'efficacité des autre composant (le moteur électrique, le calculateur moteur et le capteur de pédale d'accélération) du système grâce à la défaillance de la batterie d'attraction.

Ainsi, à partir de cette étude, nous concluons que les dysfonctionnements les plus importants concernent les composants du système de traction, qui part de la batterie de traction.

4.3.1 Constatations

À travers cette étude, on constate que la configuration en série du système de traction dans une voiture électrique fait référence à l'arrangement linéaire des composants, où la performance de chaque composant dépend de la performance du composant précédent.

En cas de défaillance d'un des composants, l'ensemble du système cesse de fonctionner. Cela rend le système vulnérable aux pannes potentielles et à leur impact sur les performances de la voiture électrique

Le tableau suivant présente un plan de maintenance pour un véhicule électrique, en indiquant la répartition du temps alloué à chaque type de maintenance :

corrective, conditionnelle, amélioration et systématique.

Plan de maintenance	Corrective	Conditionnelle	Amélioration	Systématique	Total (heures)
Temps %	90,11%	7,58%	0,22%	2,09%	100%

Table 4.7: Types de maintenance appliquer sur les VE

Après avoir examiné les différents types de maintenance actuellement adoptés par les équipes de maintenance, nous avons constaté une négligence de la maintenance préventive

À partir de là, nous nous sommes concentrés sur la maintenance préventive des trois éléments les plus importants du système de traction de la voiture électrique :

- maintenance préventive de la Batterie de propulsion ;
- maintenance préventive demoteur électrique ;
- Convertisseur de puissance ;

4.4 Résultats et Interprétations

Les 3 composants ont tous été pris en compte. Nous avons identifié 25 modes de défaillance probables des composants du groupe motopropulseur, ainsi que 30 causes de défaillance liées à ces modes de défaillance. Grâce à des articles académiques, des articles techniques et des publications industrielles, nous avons pu élaborer un programme de maintenance comprenant des activités de maintenance préventive et des périodicités correspondantes pour traiter les causes de défaillance de chaque composant.

4.4.1 Pack de batterie

Code : ES-BAT-LIP Classification : CRITIQUE, préoccupation liée à l'opérabilité

Le pack de batterie est probablement le composant le plus critique dans une voiture électrique en termes de coût, de performances et de poids, et c'est pourquoi il nécessite une attention particulière.

Les batteries modernes offrent une densité de puissance et une capacité de stockage de plus en plus élevées, mais l'autonomie de conduite reste le principal obstacle à la généralisation des véhicules électriques.

Les fonctions de base de cette unité sont les suivantes :

- Fournir de l'énergie au moteur électrique via le dispositif d'onduleur
- Fournir de l'énergie au système auxiliaire (par exemple, chauffage/climatisation, radio, unité de direction, etc.) via la batterie 12V et le convertisseur DC/DC ;
- Stocker l'énergie générée par le moteur électrique lors du freinage régénératif.

Les modes de défaillance probables identifiés pour le système de batterie sont les suivants :

- Court-circuit ;
- Surchauffe ;
- Augmentation de la résistance interne.
- Surcharge ;
- Surintensité/sous-intensité.

Ces modes de défaillance et leurs effets sur le véhicule ont été évalués , aux critères de fiabilité des actifs, aux lignes directrices de criticité potentiellement critique et de criticité économique

afin d'identifier leur niveau de criticité. Le pack de batteries est finalement classé comme CRITIQUE pour des raisons de sécurité, et le système électronique est vital

pour assurer le bon fonctionnement de cette unité importante.

Dans le tableau suivant, sont rapportés les dispositifs de détection et de protection pour chaque mode de défaillance lié à la sécurité.

Condition anormale/abusives	Dispositif de détection	Dispositif de protection
Surtempérature	Capteur de température	L'interrupteur de puissance est ouvert et isole la batterie de la charge et du redresseur
Surcharge	Surveillance permanente de l'unité de charge	Interrupteur de puissance
Surintensité	Capteur de courant de charge	Interrupteur de puissance
Court-circuit	Détecteur d'état du fusible	Fusible électrique

Table 4.8: Système de sécurité du pack de batteries : détection et protection.

Les fonctions de détection garantissent que toutes les données physiques sont mesurées avec précision.

Il est évident que, sans une acquisition fiable des données à des intervalles pertinents pour l'application, l'électronique ne pourra pas protéger les cellules lithium ou optimiser leurs performances.

Les données à mesurer dans une batterie au lithium peuvent varier en fonction de l'électrochimie, mais les valeurs suivantes sont généralement acquises par des capteurs :

- Tension de chaque cellule individuelle ;
- Tension totale de la batterie ;
- Courant de charge ;
- Température des cellules ;
- Température de l'électronique ;
- Température ambiante à l'intérieur de la batterie.

La protection est le type d'action le plus critique, car la sécurité en dépend. Un type courant de protection est l'ouverture rapide d'un commutateur de puissance réversible, qui isole le système de batterie du redresseur et de la charge.

Cette isolation empêche un certain nombre de conditions abusives d'être appliquées à la batterie.

La surcharge est un exemple de condition abusive imposée par le chargeur ; un court-circuit serait un exemple de condition imposée par la charge.

Lorsque les conditions reviennent à la normale, le commutateur de puissance se ferme.

Pour toutes ces raisons, il est évident qu'appliquer une activité de maintenance préventive au système de contrôle électronique est aussi nécessaire que pour la batterie elle-même. Au cours de l'étude, des tâches de maintenance préventive appropriées ont été identifiées pour le pack de batteries, dans le but de traiter les causes fondamentales de défaillance liées à chaque mode de défaillance.

Les activités de maintenance préventive suivantes sont les plus convenables ;

Causes de défaillance	Tâches de maintenance préventive pour chaque cause de défaillance	Fréquence et intervalle de chaque tâche de maintenance préventive [mois / kilomètres]
Défaillance du connecteur/terminal	Vérifier l'état des connecteurs et les maintenir propres, à l'abri de l'humidité et des produits chimiques	12/15,000
Défaillance du chauffage de la batterie	Vérifier le bon fonctionnement du dispositif de chauffage	12/15,000
Défaillance du capteur de batterie	Vérifier le bon fonctionnement du capteur	12/15,000
Contrainte mécanique, usure due au vieillissement	Vérifier le contrôleur de charge de la batterie pour vérifier les réglages de tension corrects	12/15,000
Défaillance du module de contrôle de la batterie	Vérifier le contrôleur de charge de la batterie pour s'assurer des réglages de tension corrects	12/15,000
	Vérifier et comparer les mesures de tension aux bornes de la batterie et au niveau du contrôleur	12/15,000
Défaillance du chargeur de batterie	Vérifier tous les sous-systèmes de charge	12/15,000

Table 4.9: Causes de défaillance et tâches de maintenance préventive pour le pack de batteries Li-Ion

4.4.2 Moteur synchrone à aimant permanent (MSAP) pour la traction

Code : EP-EMOT-MSAP Classification : Préoccupation opérationnelle CRITIQUE Le moteur électrique a pour rôle principal de fournir la puissance de traction aux roues et de déplacer le véhicule.

Cependant, dans le cas du transport purement électrique, la limitation de l'autonomie a incité les fabricants à rechercher des solutions permettant d'augmenter l'efficacité.

L'idée du freinage régénératif va dans cette direction et consiste à la capacité de générer de l'énergie électrique pendant la phase de freinage du véhicule : le moteur fonctionne comme un générateur chargeant la batterie et augmentant l'autonomie de conduite d'environ 20 à 25 %.

Les principales fonctions du moteur électrique sont les suivantes :

- Convertir l'énergie électrique en énergie mécanique ;
- Convertir l'énergie cinétique en énergie électrique.

Les modes de défaillance probables identifiés pour ce composant sont les suivants :

- Défaillance de l'enroulement ;
- Défaillance des roulements ;
- Défaillance du rotor et de l'arbre

. Chacun de ces modes de défaillance principaux a plusieurs causes de défaillance qui pourraient générer l'effet indésirable, et dans le tableau de travail de la maintenance préventive, les activités de maintenance appropriées ont été planifiées [174].

les Causes de défaillance	Tâches de maintenance préventive pour chaque cause de défaillance	Fréquence et intervalle de chaque tâche de maintenance préventive [mois / kilomètres]
Défaillance des enroulements due à une dégradation de l'isolation.	Maintenez le moteur propre avec une bonne circulation d'air.	-
Défaillance des enroulements en cas de défaut électrique	Entreposer correctement le moteur à l'abri de l'humidité et des produits chimiques.	-
Défaillance des enroulements due au stress du variateur AC	Effectuer des inspections régulières.	24 / 30,000
Défaillance des enroulements due aux cycles/flexions résultant de démarrages/arrêts fréquents	Maintenez le moteur propre avec une bonne circulation d'air	-
Défaillance des roulements due à une rupture mécanique	Remplacez les roulements	Tâche corrective
Défaillance des roulements due à la perte du film de lubrification lors des démarrages/arrêts.	Remplacez les roulements	Tâche corrective
Défaillance des roulements due à un lubrifiant inapproprié.	Remplacez les roulements	Tâche corrective
Défaillance des roulements en raison d'une manipulation/stockage inapproprié(e)	Remplacez les roulements	Tâche corrective
	Stocker le moteur correctement à l'abri de l'humidité et des produits chimiques.	-
Défaillance du rotor due à des dommages physiques et à la corrosion.	vérification de Liste des procédures d'installation standard	-

Table 4.10: Causes de défaillance et tâches de maintenance préventive pour le moteur d'un véhicule électrique

La plupart des tâches de maintenance concernent la protection du moteur contre l'humidité, la pollution, la poussière et les produits chimiques, à la fois pendant le stockage et l'utilisation, car ce sont les principales causes de défaillance. En effet, un moteur électrique a très peu de composants en mouvement à l'intérieur de son boîtier, contrairement à un moteur à combustion interne classique, ce qui limite les problèmes de friction et augmente la fiabilité. En revanche, le champ magnétique puissant généré par les aimants permanents du rotor a un effet de vieillissement sur les roulements, qui ont tout de même une longue durée de vie et assurent une certaine durabilité.

Selon l'analyse de l'amdec les défaillances d'un moteur électrique peuvent être divisées en 6 classes principales :

- Roulements ;
- Enroulement du stator (par exemple, surcharge, présence d'eau) ;
- Externes (par exemple, environnement, tension, charge).
- Barre du rotor ;
- Arbre ou accouplement.

Le diagramme suivant montre le pourcentage moyen d'occurrence de ces classes.

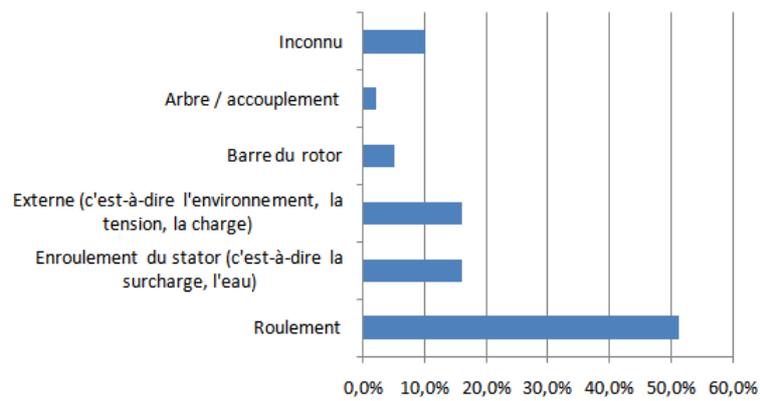


Figure 4.9: Pourcentage d'occurrence de chaque cause de défaillance du moteur électrique d'un EV

Dans le tableau suivant, les principales causes de défaillance sont résumées pour chaque constituant de la structure du moteur.

Composant du moteur	Cause de défaillance
Boîtier	- Installation incorrecte - Dommages physiques - Corrosion - Accumulation de matériau
Statore	- Dommages physiques - Contamination - Corrosion - Déséquilibre de tension - Température élevée - Support cassé
Rotor	- Stress thermique - Déséquilibre - Dommages physiques - Contamination
roulements	- Manipulation/stockage incorrects - Installation incorrecte - Désalignement - Lubrifiant inapproprié - Perte de film lubrifiant lors des démarrages/arrêts - Contamination
ventilateur	- dommages physiques - accumulation de glace - corrosion
Enroulement / Isolation	- Contamination - Surchauffe - Stockage inapproprié - Humidité - Contrainte thermique - Contrainte de l'entraînement en courant alternatif
Arbre	- Dommages physiques - Installation incorrecte
	- Fabrication incorrecte - Corrosion

Table 4.11: Causes de défaillance pour chaque composant du moteur électrique

Les travaux de maintenance en cas de panne et de révision sont pris en charge dans les installations du prestataire de services de maintenance.

Cependant, la maintenance en cas de panne des moteurs de traction électrique n'est pas courante en raison de leur taux de défaillance faible, soit environ $4,0 \times 10^{-5}$ (défaillance/heure).

4.4.3 Convertisseur de puissance - Onduleur triphasé

Code : EP-INV-3PH Classification : Préoccupation CRITIQUE pour la fonctionnalité

L'onduleur joue le rôle de connexion entre la batterie et le moteur, en assumant deux fonctions principales :

- Contrôler le moteur de traction électrique en convertissant le courant à la tension requise ;
- Recharger la batterie lors du freinage régénératif en convertissant l'énergie générée par le moteur.

Les principaux modes de défaillance identifiés pour cet appareil sont principalement au nombre de trois :

- L'appareil ne peut pas s'initialiser ;
- Sortie anormale vers le moteur ;
- Sortie anormale vers la batterie.

Le tableau ci-dessous présente les causes de défaillance et les tâches de maintenance appropriées pour traiter ces causes, avec une fréquence d'application suggérée [175].

Causes de défaillance	Tâches de maintenance préventive pour chaque cause de défaillance	Fréquence et intervalle de chaque tâche de maintenance préventive [mois / kilomètres]
Défaillance de l'isolation des enroulements	Vérifier l'état de l'isolation des enroulements	24 / 30,000
Défaillance de la douille d'isolation	Vérifier la douille d'isolation	24 / 30,000
Rupture mécanique, fissure, desserrage, abrasion ou déformation de pièces statiques ou structurelles	Maintenir l'appareil propre.	24 / 30,000
Défaillance du relais de protection.	Vérifier le bon fonctionnement du relais de protection.	12 / -
Détérioration normale due à l'âge et au phénomène de corrosion	Maintenir l'appareil propre.	24 / 30,000
Surchauffe.	Surveillance de la température, par l'unité DSP.	-
Perturbation de surtension transitoire (surcharges de commutation, arc de défaut à la terre, etc.)	Inspection de l'appareillage de commutation.	24 / 30,000

Table 4.12: Causes de défaillance et tâches de maintenance préventive pour le dispositif d'onduleur

4.5 Dusscusion

Après l'application de l'analyse LAMDEC (Lubrification, Alignement, Montage, Défauts, Ecoulement, Calage) et la simulation des performances du véhicule électrique, ainsi que la création d'un plan de maintenance préventive, voici quelques points de discussion importants :

1. Identification des principaux problèmes : Grâce à l'analyse LAMDEC, il a été possible d'identifier les principaux problèmes potentiels liés à la lubrification, à l'alignement, au montage, aux défauts, à

l'écoulement et au calage dans le système du véhicule électrique. Cette étape permet de cibler les domaines qui nécessitent une attention particulière en termes de maintenance préventive.

2. Prévention des défaillances : Le plan de maintenance préventive vise à prévenir les défaillances et à minimiser les risques de dysfonctionnement du véhicule électrique. En identifiant les composants critiques et en définissant les tâches de maintenance à effectuer régulièrement, il est possible de détecter et de corriger les problèmes potentiels avant qu'ils ne se transforment en pannes coûteuses ou en temps d'arrêt non planifiés.

3. Optimisation des performances : En effectuant des simulations de performances, il est possible d'évaluer l'impact des différentes variables et paramètres sur les performances globales du véhicule électrique. Le plan de maintenance préventive peut être utilisé pour maintenir ces variables dans des plages optimales, assurant ainsi des performances cohérentes et fiables du véhicule.

4. Réduction des coûts : La mise en place d'un plan de maintenance préventive peut contribuer à réduire les coûts associés aux pannes et aux réparations imprévues. En détectant et en traitant les problèmes à un stade précoce, les interventions de maintenance peuvent être programmées de manière plus efficace, ce qui permet d'optimiser l'utilisation des ressources et de minimiser les temps d'arrêt coûteux.

5. Amélioration de la sécurité : La maintenance préventive joue un rôle essentiel dans la sécurité du véhicule électrique. En vérifiant régulièrement les composants critiques et en effectuant les ajustements nécessaires, il est possible de prévenir les défaillances potentielles qui pourraient compromettre la sécurité des conducteurs et des passagers.

En conclusion, l'application de l'analyse LAMDEC, la simulation des performances et la création d'un plan de maintenance préventive permettent d'identifier, de prévenir et de résoudre les problèmes potentiels liés au fonctionnement du véhicule électrique. Cela permet d'optimiser les performances, de réduire les coûts et d'améliorer la sécurité, contribuant ainsi à une utilisation plus efficace et fiable du véhicule électrique.

4.6 Résultats

Les résultats obtenus dans ce chapitre mettent en évidence plusieurs aspects clés concernant la maintenance des défauts d'un véhicule électrique. Tout d'abord, l'utilisation de la méthode AMDEC a permis d'identifier les modes de défaillance potentiels et de proposer des mesures préventives et correctives appropriées. Cette approche s'est avérée efficace pour analyser en détail les différents composants et systèmes du véhicule électrique, en identifiant les points faibles et en suggérant des améliorations.

Par ailleurs, la simulation de performance a joué un rôle important dans l'évaluation des performances du véhicule électrique dans différentes conditions. Cette simulation a fourni des données précises sur les performances du véhicule dans des situations réelles ou simulées, permettant ainsi de comprendre les facteurs qui influent sur sa performance globale. Elle a également permis de repérer les zones de dégradation des performances et d'anticiper les problèmes potentiels.

Enfin, les résultats ont clairement démontré que la maintenance préventive est une solution efficace pour atténuer la dégradation des performances d'un véhicule électrique. En effectuant des inspections régulières et en prenant des mesures préventives telles que des ajustements et des remplacements de pièces, il est possible de prévenir les défaillances et de maintenir les performances optimales du véhicule sur le long terme.

En conclusion, ce chapitre met en avant l'importance de la méthode AMDEC, de la simulation de performance et de la maintenance préventive dans la gestion des défauts et la préservation des

performances des véhicules électriques. Ces approches permettent d'identifier les problèmes potentiels, de prendre des mesures préventives appropriées et d'optimiser la fiabilité et l'efficacité des véhicules électriques. En adoptant une approche proactive de la maintenance, il est possible de garantir des performances optimales et une durée de vie prolongée des véhicules électriques,

4.7 Conclusion

En conclusion de ce chapitre, nous avons examiné différents aspects de la maintenance des véhicules électriques, en mettant l'accent sur deux méthodes spécifiques : l'AMDEC (Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité) et la simulation de performance. L'AMDEC s'est révélée être une approche efficace pour identifier les modes de défaillance potentiels, évaluer leur impact sur la performance du véhicule et déterminer les actions correctives appropriées. Cette méthode permet d'anticiper les problèmes, de réduire les risques de défaillance et d'améliorer la fiabilité globale du véhicule électrique.

La simulation de performance est un outil précieux pour évaluer les performances du véhicule électrique dans différentes conditions d'utilisation. Elle permet de modéliser et d'analyser le comportement du moteur électrique, de la batterie, du calculateur et d'autres composants clés. Grâce à cette simulation, il est possible d'identifier les facteurs qui contribuent à la dégradation des performances, tels que la décharge de la batterie, l'usure des composants ou les défauts potentiels. Cela permet de prendre des mesures préventives pour minimiser cette dégradation et maintenir les performances optimales du véhicule électrique.

Parmi les solutions pour réduire la dégradation de performance d'un véhicule électrique, la maintenance préventive se distingue comme l'une des plus efficaces. En effectuant des inspections régulières, des réglages et des réparations anticipées, les problèmes potentiels peuvent être identifiés et corrigés avant qu'ils n'entraînent des pannes majeures. Cela permet de maximiser la disponibilité du véhicule, d'optimiser son rendement énergétique et de prolonger sa durée de vie.

CONCLUSION GENERALE

En conclusion, les véhicules électriques représentent une avancée majeure dans le domaine de la mobilité durable. L'essor des voitures électriques est soutenu par des avancées technologiques significatives et une prise de conscience croissante de l'impact environnemental des véhicules à combustion interne. Les véhicules électriques offrent de nombreux avantages, tels qu'une réduction des émissions de gaz à effet de serre, une autonomie croissante, des coûts d'exploitation réduits

Les composants clés d'un véhicule électrique comprennent la batterie, le moteur électrique, le convertisseur de puissance, le système de chargement et le système de freinage. Ces composants travaillent de concert pour assurer le bon fonctionnement du véhicule et fournir une expérience de conduite sûre et fiable.

La maintenance industrielle joue également un rôle crucial dans la durabilité et la performance des véhicules électriques. Différents types de maintenance, tels que la maintenance préventive et corrective, sont nécessaires pour garantir le bon fonctionnement et la longévité des véhicules électriques. Des outils et des stratégies de maintenance, tels que la TPM, le PDCA et l'AMDEC, sont utilisés pour optimiser les processus de maintenance et minimiser les temps d'arrêt.

En adoptant des véhicules électriques et en mettant en œuvre une maintenance efficace, nous pouvons contribuer à la transition vers une mobilité plus durable et réduire notre dépendance aux combustibles fossiles. Cependant, il est important de reconnaître que des défis subsistent, tels que l'infrastructure de recharge limitée et les coûts initiaux élevés des véhicules électriques. Des efforts continus de développement technologique, d'investissement dans l'infrastructure et de sensibilisation du public sont nécessaires pour promouvoir l'adoption généralisée des véhicules électriques.

En fin de compte, les véhicules électriques représentent une solution prometteuse pour réduire notre empreinte carbone et créer un avenir plus durable pour les générations futures. En combinant l'innovation technologique, la maintenance efficace et l'engagement envers la durabilité, nous pouvons favoriser une transition réussie vers une mobilité électrique et contribuer à la protection de notre environnement.

Bibliographie

- [1] B. A. K. E. B. Ahmed, B. A. B. Bouzid.
- [2] A. Guns, D. Perrin, *Rapport analytique sur l'état de l'environnement wallon* **2006**, 2007, 298–315.
- [3] A. Daanoune, Ph.D. thesis, Université de Grenoble, **2012**.
- [4] N. Yashiro, D. Carey, A. Purwin, *Études économiques de l'OCDE* **2022**, 98–166.
- [5] R. Ayadi **2020**.
- [6] A. Cherigui, A. Badra, et al., Ph.D. thesis, university of M'sila, **2022**.
- [7] C. AMARA, K. BENCHOHRA, Ph.D. thesis, Directeur : Mme N. KANOUN/Co-Directeur : Mr G. ABDELLAOUI, **2021**.
- [8] K. Houacine, Ph.D. thesis, Université Mouloud Mammeri, **2016**.
- [9] C. Lamy, J.-M. Léger, *Le Journal de Physique IV* **1994**, 4, C1–253.
- [10] D. C. E. L. B. Mbemba, Ph.D. thesis, Université de Franche-Comté, **2012**.
- [11] R. Benlamine, M. A. Mira, Ph.D. thesis, **2010**.
- [12] J. Bernard, Ph.D. thesis, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambresis, **2007**.
- [13] S. Delprat, Ph.D. thesis, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambresis, **2002**.
- [14] L. Horrein, Ph.D. thesis, Lille 1, **2015**.
- [15] V. Mester, Ph.D. thesis, Ecole Centrale de Lille, **2007**.
- [16] T.-H. Tran, Ph.D. thesis, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambresis, **2014**.
- [17] I. Vechiu, Ph.D. thesis, Université du Havre, **2005**.
- [18] U. Köhler, J. Kümpers, M. Ullrich, *Journal of power sources* **2002**, 105, 139–144.
- [19] A. Eddahech, Ph.D. thesis, Bordeaux 1, **2013**.
- [20] H. Al Jed, Ph.D. thesis, Université de Bordeaux, **2014**.
- [21] B. Kennedy, D. Patterson, S. Camilleri, *Journal of Power Sources* **2000**, 90, 156–162.

- [22] K. Takeno, M. Ichimura, K. Takano, J. Yamaki, S. Okada, *Journal of Power Sources* **2004**, 128, 67–75.
- [23] G. Coquil, Ph.D. thesis, Université Montpellier, **2019**.
- [24] J. Bidal, Ph.D. thesis, Amiens, **2021**.
- [25] B. Riad, et al. **2020**.
- [26] K. Huang, J. Li, Z. Xu, *Waste management* **2010**, 30, 2292–2298.
- [27] P. Bernard, M. Lippert in *Electrochemical energy storage for renewable sources and grid balancing*, Elsevier, **2015**, pp. 223–251.
- [28] S. Petrovic, S. Petrovic, *Battery Technology Crash Course : A Concise Introduction* **2021**, 73–88.
- [29] M. B. C. Camara, Ph.D. thesis, Université de Franche-Comté, **2007**.
- [30] R. Sadoun, Ph.D. thesis, Ecole Centrale de Lille, **2013**.
- [31] M. A. BOUZID, et al., Ph.D. thesis, **2018**.
- [32] A. Rabah, Ph.D. thesis, Université Ibn Khaldoun-Tiaret-, **2020**.
- [33] A. CHARIF, Ph.D. thesis, Université Mohamed Boudiaf-M'Sila, **2012**.
- [34] S. Sabah, Ph.D. thesis, Université Mouloud Mammeri, **2016**.
- [35] B. DAHMANI, A. MAALMI, et al., Ph.D. thesis, university of M'sila, **2022**.
- [36] A. Smail, A. Idir, Ph.D. thesis, Université Mouloud Mammeri, **2013**.
- [37] B. Multon, *Revue Générale de l'Electricité* **1994**, pp–11.
- [38] V. Reinbold, Ph.D. thesis, Université de Grenoble, **2014**.
- [39] B. Multon, L. Hirsinger, *La Revue 3 E. I* **1995**, pp–53.
- [40] C.-V. Hémary, Ph.D. thesis, Université de Grenoble, **2013**.
- [41] F. Faure, Ph.D. thesis, Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG, **2003**.
- [42] R. Mokrani, Ph.D. thesis, Université Cheikh Larbi-Tebessi-Tébessa, **2009**.
- [43] I. F. BOUGUENNA, et al., Ph.D. thesis, **2020**.
- [44] P. Thounthong, Ph.D. thesis, Institut National Polytechnique de Lorraine-INPL, **2005**.
- [45] S. SAKER, Ph.D. thesis, Université Mohamed Khider-Biskra, **2013**.
- [46] N. BELHAOUCHET, Ph.D. thesis, **2014**.
- [47] Y. Pankow, et al., *National School Superior of Art and Trades, Lille* **2004**.
- [48] L. Michel, Ph.D. thesis, Université du Québec à Trois-Rivières, **2012**.

- [49] O. Langlois, Ph.D. thesis, **2006**.
- [50] B. BENARIF, A. TATOU, Ph.D. thesis, Université Kasdi Merbah Ouargla.
- [51] B. Amar, A. Sabrina, Ph.D. thesis, Université Mouloud Mammeri, **2018**.
- [52] M. Lopez, Ph.D. thesis, Université Paris Sud-Paris XI, **2008**.
- [53] B. Chauchat, Ph.D. thesis, Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG, **1997**.
- [54] M. Campana, F. Demarcq, D. Pillet, *Rapport technique* **2020**.
- [55] D. Dobrzański, *Maszyny Elektryczne : zeszyty problemowe* **2017**.
- [56] F. Montoya, J. M.-L. J. Torres-Moreno, F. M.-A. V. Barón, *system* **2016**, 6, 7.
- [57] S. Jaman, B. Verbrugge, O. H. Garcia, M. Abdel-Monem, B. Oliver, T. Geury, O. Hegazy, *Energies* **2022**, 15, 7364.
- [58] R. Mathieu, Ph.D. thesis, Bordeaux, **2020**.
- [59] J.-M. Proulx, M. en Ingénierie, Ph.D. thesis, Université de Sherbrooke, **2014**.
- [60] M. Ivaldi, E. Quinet, E. Windisch **2011**.
- [61] C. AMARA, K. BENCHOHRA, Ph.D. thesis, Directeur : Mme N. KANOUN/Co-Directeur : Mr G. ABDELLAOUI, **2021**.
- [62] H. GHARBI, Ph.D. thesis, Boucherit Med Sghir, **2015**.
- [63] W. Lajnef, Ph.D. thesis, Université Sciences et Technologies-Bordeaux I, **2006**.
- [64] J. Lozada, X. Boutillon, M. Hafez in *CFM 2007-18ème Congrès Français de Mécanique*, AFM, Maison de la Mécanique, 39/41 rue Louis Blanc-92400 Courbevoie.
- [65] S. Campeau, *Conception et analyse d'un véhicule hybride à configuration parallèle*, National Library of Canada= Bibliothèque nationale du Canada, Ottawa, **2001**.
- [66] S. R.-B. Alaeddine, Ph.D. thesis, **2021**.
- [67] F. Badin, *Les véhicules hybrides : Des composants au système*, Editions Technip, **2013**.
- [68] J.-L. LILIEN, *Cours donnée l'Institut d'Electricité Montefiore-Université de Liege* **2006**, 92.
- [69] P.-Y. Lucas, Ph.D. thesis, Brest, **2016**.
- [70] Y. Chassin, G. Tremblay, *Doit-on subventionner l'achat de voitures électriques?*, Institut économique de Montréal, **2014**.
- [71] V.-S. Adrien **2013**.
- [72] M. Solignac, Ph.D. thesis, Paris Est, **2018**.
- [73] M. Attia, M. Bechouat, M. Sedraoui, Z. Aoulmi, *European Journal of Electrical Engineering* **2022**, 24, 97.

- [74] P. Courbe, *Changer de mobilité, pas de voiture* **2010**.
- [75] F. LOGHRAB, Ph.D. thesis, Université Mohamed Boudiaf-M'Sila, **2011**.
- [76] H. Bouab, M. Garn, Ph.D. thesis, Université Ibn Khaldoun-Tiaret-, **2022**.
- [77] C. Kamel **2020**.
- [78] A. Bennane, Ph.D. thesis, École Polytechnique de Montréal, **2010**.
- [79] W. LAALA, H. A. HADRI, M. SAHRAOUI **2010**.
- [80] A. Aichoun, Ph.D. thesis, Université Mouloud Mammeri Tizi Ouzou, **2022**.
- [81] M. Tallmann, *Annals of hematology* **2004**, *83*, S81–2.
- [82] S. Bensaada, M. BOUZIANE, F. MOHAMMEDI, D. FELLIACHI **2012**.
- [83] H. BENARIBA **2021**.
- [84] S. KHADAR, K. BOUCHERIH, Ph.D. thesis, Université Ibn Khaldoun-Tiaret-, **2017**.
- [85] D.-T. Nguyen, Ph.D. thesis, Université Grenoble Alpes, **2015**.
- [86] R. Affogbolo, C. Gauzente, P. Kuntz in *XXIVème Conférence de l'AIM, Nantes, France*.
- [87] R. MOKADEM, F. MESSAOUD, Ph.D. thesis, Université Ibn Khaldoun-Tiaret-, **2017**.
- [88] A. Salah, M. Aljammal, Ph.D. thesis, Univ M'sila, **2020**.
- [89] O. BOUMOUS, B. MERAMRIA, Ph.D. thesis, **2022**.
- [90] N. Mekroud, Ph.D. thesis, **2018**.
- [91] E. Brangier, A. Lancry, C. Louche **2004**.
- [92] T. Coudert, Ph.D. thesis, Toulouse, INPT, **2000**.
- [93] T. Hassan, Ph.D. thesis, INSA de Lyon, **2006**.
- [94] N. E. AZANTCHESSOU, *Conception et réalisation d'une application pour la gestion du dossier médical personnel*, Tech. Rep., EPAC/UAC, **2018**.
- [95] R. NOUI, M. A. GHEDEIR, Ph.D. thesis.
- [96] B. Houessou, Ph.D. thesis, École de technologie supérieure, **2015**.
- [97] M. Thévenet, C. Dejoux, É. Marbot, É. Normand, A.-F. Bender, *Fonctions RH : politiques, métiers et outils des ressources humaines*, Pearson Education France, **2009**.
- [98] E. Hafsa, E. B. Asmae.
- [99] G. CEREMO, *Cahier de Recherche n* **2006**, *02*.
- [100] E. Bouaiti, S. Zidouh, A. Boufaress, J. Kessouati, S. Elkafssaoui, M. Mrabet, L. Belyamani, *Revue d'Épidémiologie et de Santé Publique* **2016**, *64*, S140.

- [101] J.-C. Corbel, *Management de projet*, 2003.
- [102] B. GHAZI, A. MEDJADI, Ph.D. thesis, Université Ibn Khaldoun-Tiaret-, 2021.
- [103] B. Quelenec, L. Beretz, M. Guillot, O. Collange, J. Pottecher, B. Gourieux, *RISQUES & QUALITÉ* 2013, 10.
- [104] F. Hurtrel, L. Beretz, V. Renard, A. Hutt, *Risques & qualité* 2012, 1, 22–30.
- [105] H. AOUAG, Ph.D. thesis, Université de Batna 2, 2016.
- [106] L. Gardes, Ph.D. thesis, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne ; INSA de Lyon, 2001.
- [107] R. Bonnard, *Paris : Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques* 2001, 70.
- [108] A. Seffah, C. Kolski, D. Idoughi in *Proceedings of the 21st International Conference on Association Francophone d'Interaction Homme-Machine*, pp. 333–336.
- [109] V. Malépart, F. Boctor, J. Renaud, S. Labillois, *Revue Française de Gestion Industrielle* 2003, 22, 15–31.
- [110] M. DENFAR, S. A. ZERROUKI, Ph.D. thesis, Université Ibn Khaldoun-Tiaret-, 2021.
- [111] M. Amy, Ph.D. thesis, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2020.
- [112] A.-L. Benaben, Ph.D. thesis, 2009.
- [113] A. Kalakech, Ph.D. thesis, Institut National Polytechnique de Toulouse-INPT, 2005.
- [114] M. Brini, Ph.D. thesis, Compiègne, 2018.
- [115] R. BENAMIROUCHE.
- [116] Y. HADJ DOUDOU, S. A. A. A. RAEA, Ph.D. thesis, univ msila, 2021.
- [117] S. Beleulmi, A. Bellaouar, M. Lachi 2017.
- [118] M. H. Mazouni, Ph.D. thesis, Institut National Polytechnique de Lorraine-INPL, 2008.
- [119] N. Tazi, Ph.D. thesis, Troyes, 2018.
- [120] A. Latoui, Ph.D. thesis, 2018.
- [121] O. Mebrouk, N. M. Mokhtar, Ph.D. thesis, 2014.
- [122] E. R. Iglesias, Ph.D. thesis, Université de Lyon, 2017.
- [123] P. Ribot, Ph.D. thesis, Université Paul Sabatier-Toulouse III, 2009.
- [124] A. SLIM, Ph.D. thesis, Université Mohamed Boudiaf-M'Sila, 2012.
- [125] Y. Fraiji, Ph.D. thesis, Normandie, 2021.
- [126] J.-C. Trigeassou, *Diagnostic des machines électriques*, Lavoisier, 2011.

- [127] A. J. BONON, V. S. HOUNDEDAKO, G. F. ANAGO, T. R. JOSSOU, E. d'ALMEIDA, *Etude et proposition de protocoles de qualification et de maintenance des automates d'hématologie*, Tech. Rep., EPAC/UAC, **2016**.
- [128] M. Megdiche, Ph.D. thesis, Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG, **2004**.
- [129] M. Emilie Jacques, J.-M. Jacques **2020**.
- [130] A. Mokhtari, Ph.D. thesis, INSA de Toulouse, **2007**.
- [131] G. Sabatier, F. Ragusa, H. Antz, *Manuel de technologie mécanique*, Dunod, **2006**.
- [132] L. Ngom-Dieng, Ph.D. thesis, Université Grenoble Alpes (ComUE), **2015**.
- [133] N. Freychet, Ph.D. thesis, Grenoble, **2012**.
- [134] G. Musca, *M@ n@ gement* **2006**, 9, 153–176.
- [135] M. Vuillet, Ph.D. thesis, Thèse de Doctorat, Université Paris-Est, École doctorale Ville, Transports ..., **2012**.
- [136] H. Rezgui Chaabouni, Ph.D. thesis, Limoges, **2020**.
- [137] L. Long, S. Wang, M. Xiao, Y. Meng, *Journal of Materials Chemistry A* **2016**, 4, 10038–10069.
- [138] D. Vinh, Ph.D. thesis, Université de Technologie de Compiègne, **2010**.
- [139] L. Mokrani, Ph.D. thesis, Université de Batna 2, **2005**.
- [140] S. MAADADI, A. SEMMANA, S. BENTOUATI **2022**.
- [141] K. Itani, Ph.D. thesis, Université Paris Saclay (COMUE), **2017**.
- [142] P. Kotler, W. Pfoertsch, *La marque dans le produit : Comment créer de la valeur avec une marque-composant? D'Intel Inside à Shimano, en passant par Telfon*, De Boeck Supérieur, **2013**.
- [143] M. JUFER, *POLLUTION ATMOSPHERIQUE* **2014**, 59.
- [144] L. Cuvelier, Ph.D. thesis, Paris, CNAM, **2011**.
- [145] M. Khanchoul, Ph.D. thesis, Paris 11, **2012**.
- [146] B. Gérardin, Ph.D. thesis, Centre d'études sur les réseaux, les transports, l'urbanisme et les ..., **2007**.
- [147] W. Boukhedna **2018**.
- [148] D. F. LES ÎLES **2016**.
- [149] H. Abraham, E. Bloch, L. Bloch, *Journal de Physique et le Radium* **1920**, 1, 44–57.
- [150] F. BELOUCIF **2019**.
- [151] J. MARAIS, M. BERBINEAU **2004**.

- [152] C. Schulz, Ph.D. thesis, Artois, **2010**.
- [153] K. L. McIlwain, M. Y. Merriweather, L. A. Yuva-Paylor, R. Paylor, *Physiology & behavior* **2001**, 73, 705–717.
- [154] S. Cai, Ph.D. thesis, Belfort-Montbéliard, **2011**.
- [155] D. Bellem, Ph.D. thesis, **2016**.
- [156] H. Aziza, Ph.D. thesis, Aix Marseille Université (AMU), **2012**.
- [157] S. Piechowiak, *Intelligence artificielle et diagnostic*, Ed. Techniques Ingénieur, **2003**.
- [158] N. Lacker, *AGILITY by ARIS Business Process Management : Yearbook Business Process Excellence 2006/2007* **2006**, 11–15.
- [159] B. Rakita, V. Madić, D. Marković, *Industrija* **2017**, 45.
- [160] O. Pinaud, Ph.D. thesis, Grenoble, **2014**.
- [161] S. Belhour, T. Benmansour, Ph.D. thesis, Université Frères Mentouri-Constantine 1, **2008**.
- [162] M. Slimani, M. Y. Bouzidi, Ph.D. thesis, **2015**.
- [163] B. Abdallah, Ph.D. thesis, Doctoral dissertation, Université de Mostaganem, **2021**.
- [164] A. SIBOUKEUR, F. HATHAT, Ph.D. thesis.
- [165] K. B. BENAÏSSA, N. BENALI, Ph.D. thesis, Université Ibn Khaldoun-Tiaret-, **2020**.
- [166] M. BOUZERKOULA, K. DJERIBA, M. GUEMANA **2015**.
- [167] L. Froquet, Ph.D. thesis, Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG, **2005**.
- [168] R. Gouriveau, K. Medjaher, N. Zerhouni, *Du concept de PHM à la maintenance prédictive 1: Surveillance et pronostic, Vol. 3*, ISTE Group, **2017**.
- [169] S. Thellier, Ph.D. thesis, Paris, CNAM, **2017**.
- [170] F. Bouras, M. W. Babaabdoun, A. Dib **2020**.
- [171] G. Farges, *IRBM News* **2015**, 36, 51–55.
- [172] M. Attia, F. Zaamouche, A. Houam, R. Daouadi, *European Journal of Electrical Engineering* **2022**, 24, 239.
- [173] A. MOUSSA, Ph.D. thesis, Université Badji Mokhtar Annaba.
- [174] A. Houam, F. Zaamouche, R. Daouadi, M. Attia, *European Journal of Electrical Engineering* **2022**, 24, 257.
- [175] R. Daouadi, F. Zaamouche, M. Attia, A. Houam, *European Journal of Electrical Engineering* **2023**, 25, 9.