

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ IBN-KHALDOUN DE TIARET

FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUEES
DÉPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du diplôme de Master

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Réseaux Electriques

THÈME

**Répartition d'Energie d'un Véhicule Electrique
par la Technique de Réseaux de Neurones**

Préparé par :

LABDOUNI NESRINE

LATRECHE SIHAM

Devant le Jury:

Nom et Prénoms

Grade

Qualité

A. SMAILI

Pr

Président

R. ARARIA

MAB

Examineur 1

A. BERKANI

MCA

Examineur 2

H. BOURENANE

MAA

Encadreur

PROMOTION 2021 /2022.

REMERSIEMENTS

Nos remerciements avant tout à «ALLAH», le tout puissant pour la force, la volonté, la santé et la patience qu'il nous a donné pour mener à bien nos étude.

*Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à notre promoteur madame **H.BOURENANE** pour sa disponibilité, sa confiance ainsi que ses conseils précieux et ses encouragements pour accomplir ce modeste travail.*

Nous remercions les membres de jury, chacun par son nom, qui nous a honorés en acceptant d'examiner notre travail.

Nous aimerons à remercier l'ensemble des enseignants qui ont contribué de près ou de loin à notre formation, sans oublier nos collègues de Master 2 Réseaux électriques.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

Mes chers parents qui ont toujours cru en moi et ont mis à ma disposition tous les moyens nécessaires pour que je réussisse dans mes études.

Mes frères, mes sœurs, neveux et nièces.

Toute la famille. « LABDOUNI »

Tous mes amis.

Tous ceux que j'aime.

Tous mes enseignants depuis le primaire

Tous ceux qui me sont chers

Tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin à réaliser ce modeste travail.

Tous qui vont lire ce mémoire

*Nesrine**

Dédicaces

*Je dédie ce travail avec toute la gratitude à ma mère
pour ses prières et pour tant d'années. D'amour, de sacrifices,
d'encouragements et de soutien moral.*

À celui qui tenait toujours ma réussite à cœur.

Ce travail est à la mémoire de mon père paix à son âme.

À mes frères, mes sœurs, neveux

«Abdelnour.Houcine.Younesse.»

À toute ma famille « LATRECHE ».

À tous mes amis.

À tous ceux que j'aime.

À tous mes profs et mes collègues.

À ceux qui vont lire ce mémoire.

*Siham**

Sommaire

Remerciement

Dédicace

Liste de Figure

Liste de Tableaux

Nomenclature

Sommaire

Introduction Générale	1
Chapitre I Généralités sur la Chaîne d'Entraînement des Véhicules Electriques	
I.1. Introduction.....	3
I.2. Définition d'un Véhicule Electrique (VE).....	3
I.3. Historique des Véhicules Electriques	4
I.4. Chaîne de Traction des Véhicules Electriques.....	5
I.4.1. Source d'Energie Electrique.....	6
I.4.1.1. Unité de Stockage d'Energie	6
I.4.1.1.1. Batteries.....	6
I.4.1.1.2. Super Condensateurs	6
I.4.1.1.3. Stockage d'Energie du Volant.....	6
I.4.1.2. Unité de Production d'Energie.....	7
I.4.1.2.1. Pile à Combustible.....	7
I.4.1.2.2. Générateur Thermoélectrique Automobile.....	8
I.4.1.2.3. Freinage Régénératif.....	9
I.4.2. Convertisseurs Statiques.....	9
I.4.2.1. Redresseurs (AC-DC).....	9
I.4.2.2. Onduleurs (DC-AC).....	10
I.4.2.3. Hacheur (DC-DC).....	10
I.4.3. Moteurs Electriques.....	10
I.4.3.1. Moteurs à Courant Continu.....	11
I.4.3.2. Moteurs à Courant Alternatif.....	11
I.4.3.2.1. Moteur Asynchrone à induction	11
I.4.3.2.2. Moteur Synchrone.....	12
I.4.3.3. Comparaison entre quatre types d'entraînement.....	12
I.5. Principaux Types des Véhicules Electriques.....	
I.5.1. Véhicules Electriques à Batterie.....	13
I.5.2. Véhicule Electrique Hybride (HEV).....	14

I.5.3. Véhicule Electrique Hybride Rechargeable (VEHR) ou Plug-In.....	15
I.5.4. Véhicules Electriques à Pile à Combustible(VEPC).....	15
I.6. Recharge des Véhicules Electriques.....	17
I.6.1. Principe de Chargeur.....	17
I.6.2. Types de systèmes de recharge.....	17
I.6.2.1. Charge Conductrice.....	17
I.6.2.2.Charge inductive.....	18
I.6.2.3. Changement de batterie.....	19
I.6.3. Modes de Connexion des Chargeurs pour VE.....	19
I.7. Systèmes de Sécurité.....	20
I.7.1. Protection Contre les Chocs électriques.....	20
I.7.2. Sécurité du Batterie.....	21
I.7.3. Risque Electrique.....	21
I.7.4. Sécurité des Opérations de Chargement des Batteries.....	21
I.9. Technologie Véhicule-Réseau (V2G).....	21
I.10. Avantages et Inconvénient des VE.....	22
I.10. Conclusion.....	23
 <i>Chapitre II Modélisation des Constituants de la Chaîne d’Entrainement des VEs</i>	
II.1.Introduction.....	24
II.2. Principe de Fonctionnement d’un Véhicule Electrique.....	24
II.3. Modèle Dynamique du Véhicule.....	25
II.3.1. la Force de résistance au Roulement	26
II.3.2. Trainée aérodynamique F_{ad}	26
II.3.3. Force de résistance de la pente F_{cr}	26
II.3.4. Force de stokes ou de frictions visqueuses	26
II.4. Modélisation de la Batterie.....	27
II.5. Modélisation de Pile à Combustible.....	29
II.6. Convertisseur Statique.....	29
II.6.1. Modélisation de Convertisseur Buck.....	29
II.6.2. Modélisation de Convertisseur Boost.....	32
II.6.3. Modélisation de Convertisseur Bidirectionnel Buck-Boost.....	34
II.7. Modélisation de l’Onduleur de Tension.....	35
II.7.1. Commande par Modulation de Largeur d’Impulsion (MLI).....	36

II.8. Modélisation du Moteur Electrique.....	38
II.8.1. Principe de Fonctionnement d'une MSAP.....	38
II.8.2. Modélisation de la Machine Synchrone à Aimants Permanents (MSAP).....	38
II.8.3. Les équations de MSAP dans le référentiel (a, b, c).....	38
II.8.3.1. Équations électriques.....	39
II.8.3.2. Équations mécaniques.....	40
II.8.4. Transformation de Park.....	41
II.8.5. Equations d'état de la MSAP.....	42
II.8.6. Equations de la machine dans les axes d-q.....	43
II.8. Conclusion.....	45
 Chapitre III <i>Commande et Gestion d'Energie d' VEs</i>	
III.1. Introduction.....	46
III.2. Différentes Commande Appliquées aux Véhicules Electriques.....	46
III.3. Commande de Machine MSAP.....	46
III.3.1. Principe de la Commande Vectorielle.....	46
III.3.2. Découplage par compensation.....	48
III.3.3. Régulateur PI.....	50
III.3.3.1 Dimensionnement des régulateurs.....	51
III.3.3.2. Utilisation d'un Régulateur PI pour la boucle de courant.....	52
III.3.3.3. Régulateur de vitesse.....	53
III.4. Gestion d'énergie d'un Véhicule Electrique.....	54
III.4.1. Présentation de la méthode de gestion.....	55
III.4.2. Modes de Fonctionnement.....	55
III.4.3. L'organigramme de gestion d'énergie.....	57
III.5. Simulation de la chaine de traction	57
III.5.1. Résultats de Simulation de l'Entrainement Electrique.....	58
III.5.3. Résultats de Simulation de la Gestion Energétique.....	61
III.6. Gestion d'Energie de VE par la technique de RNA.....	64
III.6.1. Définition de Réseaux de neurones artificiels.....	64
III.6.2. Conception et programmation des modèles RNA.....	65
III.6.3. Structure du réseau de neurone.....	66
III.6.3.1. Perceptron Multicouche.....	66
III.6.4. Adaptation des mesures avec les entrées du RNA.....	66
III.6.5. Structure Finale Utilisée.....	67

Sommaire

III.6.6. Courbes de Régression.....	69
III.7.Conclusion.....	72
Conclusion Générale.....	73
Bibliographie	
Résumé	

Liste des Figures

Liste des Figures

Chapitre I : Généralités sur la Chaîne d'Entrainement des Véhicules Electriques

Figure I.1: Véhicule électrique (VE).....	3
Figure I.2 : Le Tesla Roadster I.....	5
Figure I.3: Eléments Constituant un Véhicule Electrique.....	5
Figure I.4 : Volants d’Inertie.....	7
Figure I.5 : Pile à Combustible.....	8
Figure I.6 : Thermoélectricité.....	8
Figure I.7 :Freinage Régénératif.....	9
Figure I.8 : Synoptique des étapes de conversion d’un chargeur.....	17
Figure I.9 : Charge Conductrice.....	18
Figure I.10 : Charge Inductive.....	18
Figure I.11 : Changement de Batterie.....	19
Figure I.12 : Modes de Connexion.....	20
Figure I.13: Vehicle to Grid (V2G).....	22

Chapitre II : Modélisation des Constituants de la Chaîne d'Entrainement des VEs

Figure II.1: Fonctionnement d’un Véhicule Electrique.....	25
FigureII.2: Représentation schématique des forces agissant sur le véhicule en mouvement.....	25
FigureII.3: modélisation de la batterie.....	28
FigureII.4 : Schéma de montage de convertisseur Buck.....	29
FigureII.5 : Schéma de montage de convertisseur lorsque interrupteur passant.....	30
Figure II.6: Schéma de montage de convertisseur lorsque interrupteur est bloqué.....	31
FigureII.7: schéma de convertisseuBooste.....	32
FigureII.8 : Circuit Boost lors de la fermeture du MOSFET.....	32
Figure II.9: Circuit Boost lors de l’ouverture du MOSFET.....	33
Figure II.10 : schéma de convertisseur Buck-Boost.....	34
Figure II.11: Schéma de l’Onduleur de Tension à deux niveaux.....	35
Figure II.12: Schéma de principe de MLI sinus-triangle.....	37
Figure II.13 : Principe de la commande MLI	37
Figure II.14 : Schéma de la MSAP.....	39
Figure II.15: Représentation de la Transformation de Park.....	41

Liste des Figures

Chapitre III : Commande et Gestion d'Energie d' VEs

Figure III.1. Différentes techniques de contrôle.....	47
Figure III.2 : Commande par Orientation du Champ de la MSAP.....	47
Figure III.3 : Principe de Découplage par Compensation.....	49
Figure III.4 : Schéma Bloc du MSAP après Orientation du Champ Couplé à la roue.....	50
Figure III.5 : Régulateur PI.....	50
Figure III.6 : Régulation de Courant avec Correcteur PI	52
Figure III.7 : Schéma fonctionnel de régulation de vitesse.....	53
Figure III.8 : Commande vectorielle dans le référentiel d, q.....	54
Figure III.9 : Présentation de la méthode de gestion.....	55
Figure III.10: Différents modes de flux d'énergie.....	56
Figure III.11 : L'organigramme de Gestion d'Energie.....	57
Figure III.12 : Schéma Global du Système de Traction d'un VE.....	58
Figure III.13 : Position de la pédale.....	58
Figure III.14 : Couple électromagnétique de la MSAP.....	59
Figure III.15 : Vitesse de rotation mécanique du rotor.....	59
Figure III.16 : Courant statorique du MSAP.....	60
Figure III.17 : Courants statoriques de la MSAP.....	60
Figure III.18: Tension, courant et état de la charge (SOC) de la batterie.....	62
Figure III.19 : Tension et Courant de la PAC.....	63
Figure III.20 : Puissance du moteur, de la batterie et de la PAC.....	64
Figure III.21 : Représentation schématique des réseaux de neurones artificiels	65
Figure III.22: conception d'un modèle de réseau neuronal artificiel.....	65
Figure III.23 : Structure du réseau Perceptron multicouche.....	66
Figure III.24 Structure Finale pour la Bas d'Entraînement.....	67
Figure III.25. L'architecture du RNA.....	68
Figure III.26. Fenêtre d'entraînement.....	69
Figure III.27. Courbes de Régressions.....	70
Figure III.28. Diagramme de simulation de RNA.....	70
Figure III.29. Implantation de RNA.....	71
Figure III.30 : Courbe des Modes.....	71

*Liste des
Tableaux*

Liste des Tableaux

Chapitre I Généralités sur la Chaîne d'Entraînement des Véhicules Electriques

Tableau I.1: Comparaison des quatre Moteurs.....	13
Tableau I.2 : Principales caractéristiques des véhicules électriques.....	16
Tableau I.3 : Temps de charge des batteries.....	17

Chapitre III Commande et Gestion d'Energie d' VEs

Tableau III. 1 : Adaptation des mesures avec les entrées du réseau de neurones.....	67
Tableau III. 2 : Sorties du réseau neuronal.....	67
Tableau III.3: Tableau d'Entraînement.....	68

Nomenclature

- F_{ad} : Trainée aérodynamique
- F_{sf} : Force de Stokes ou de frictions visqueuses
- F_{r0} : Force de résistance au roulement
- F_{cr} : Force de résistance de la pente
- C_d : Le coefficient de résistance au roulement des pneus
- ρ : Masse volumique
- C_f : Coefficient de frottement aérodynamique de pénétration dans l'air.
- A_f : Surface frontale du véhicule
- V_r : Vitesse relative du véhicule
- V : Vitesse du véhicule
- V_w : Vitesse du vent
- m : Masse du véhicule
- g : Accélération gravitationnelle
- k_a : Coefficient de stokes.
- F_{tr} : Force de traction des pneus.
- k_m : Coefficient d'inertie rotationnelle (facteur de masse).
- $mi = k_m m$: Masse d'inertie du véhicule.
- α : Accélération du véhicule.
- p : Puissance mécanique
- V_{bat} : Batterie de tension
- I_{bat} : Batterie actuelle
- P_{bat} : la puissance de la batterie
- C_n : Capacité nominale
- η_{ch} : Efficacité de la batterie pendant la phase de charge
- η_{disch} : Efficacité de la batterie pendant la phase de décharge
- V_{dc} : Tension du bus CC [V]
- R : Constante de gaz universelle
- E_0 : Potentiel de cellule réversible standard
- E_{nerst} : La tension de Nernst
- N_0 : Nombre de cellules dans la pile
- T_s : La température de la cheminée
- F : la constante de Faraday

Nomenclature

P_{H_2} : Pressions partielles d'hydrogène

P_{O_2} : Pressions partielles d'hydroxygène

P_{H_2O} : Pressions partielles de l'eau

V_{act} : La surtension d'activation

V_{ohm} : La surtension ohmique

V_{conc} : La surtension de concentration

V_{PAC} : La surtension pile à combustible

J_m : Moment d'inertie

f_m : Coefficient de frottement.

C_{em} : Couple électromagnétique.

C_r : Couple résistant

θ : Angle de charge désignant la position du rotor par rapport au stator

ϕ_f : La valeur crête constante du flux créée par l'aimant lisse à travers les enroulements statoriques.

ω_r : vitesse de rotation du rotor (rad/s).

ω : Pulsation des courants alternatifs (rad/s).

p : Nombre de paires de pôles.

J : Moment d'inertie de la partie tournante

f_r : Coefficient de frottement visqueux

X : Vecteur d'état

U : Vecteur de commande

A : Matrice fondamentale qui caractérise le système

B : Matrice d'application de la commande

VE : Véhicule électrique

VEH : Véhicule électrique hybride

VEB : Véhicule électrique à batterie

VEHR : Véhicule Electrique Hybride Rechargeable

SOC : L'état de charge

SC : Super Condensateurs

FES : stockage d'énergie du volant

PAC : pile à combustible

GTEA : générateur thermoélectrique automobile

Nomenclature

CEI : Moteur à combustion interne

AC : courant alternatif

DC : courant continu

MLI : Modulation de Largeur d'Impulsion

IGBT : Insulated Gate Bipolar Transistor

MCC : Moteurs à Courant Continu

MI : moteurs à induction et à aimant permanent

MSAP : Le moteur synchrone à aimant permanent

BSS : station d'échange de batterie

V2G : Véhicule-au-réseau

Introduction
Générale

Introduction Générale

Aujourd'hui, il y a plus d'un milliard de véhicules sur les routes, et les constructeurs automobiles produisent plus de 80 millions de nouveaux véhicules chaque année, dont la plupart sont équipés d'un moteur CEI, alimenté par une énergie conventionnelle [1], provoquant du bruit et des émissions de gaz à effet de serre comme ainsi qu'une consommation de carburant en constante augmentation. À placer cet élément de consommation au centre des débats énergétiques. Le mode de transport est le plus énergivore par rapport aux tonnes de produits et de passagers transportés au kilomètre, les émissions de dioxyde de carbone ne cessent d'augmenter [2].

Compte tenu des problèmes de gestion de l'environnement et de l'énergie et pour parvenir à une mobilité plus propre et plus verte dans les villes très surpeuplées des zones urbaines du monde, les scientifiques ont remplacé les véhicules classiques par des véhicules électriques comme l'une des solutions. Ces véhicules sont considérés comme l'une des meilleures possibilités pour une démonstration plus saine, il est alimenté par des sources d'énergie, la batterie qui forme l'élément qui stocke l'électricité grâce à la solution chimique, étant donné que la batterie ne convient pas comme source d'alimentation pour les véhicules électriques. Pour cela, les chercheurs travaillent ce point en mettant en place des solutions de stockage plus performantes et exploitent aussi de nouveaux matériaux pour inventer des technologies modernes des batteries l'une des solutions proposées consiste à utiliser des sources auxiliaires de puissance comme les super condensateurs ou la pile à combustible [3]. L'utilisation d'une source secondaire d'appoint nécessite une méthode de gestion d'énergie robuste pour ne pas trop décharger les batteries. Cette méthode consiste à utiliser la source primaire seule pour propulser le véhicule et quand l'énergie de cette dernière atteint une valeur minimale de son état de charge, la deuxième source prend la relève.

Le système de commande d'entraînement est la technologie principale du véhicule électrique. Le moteur synchrone à aimants permanents est largement utilisé dans les véhicules électriques, grâce à ses caractéristiques de performance souhaitées, notamment sa densité de puissance élevée, son rapport couple/poids élevé, sa fiabilité et son rendement élevé.

La techniques de contrôle de MSAP dans l'étude bibliographique, bien que le régulateur PI soit un choix populaire en raison de sa simplicité et de sa facilité de mise en œuvre. Cependant, il ne prend pas en compte les perturbations et les incertitudes, ce qui conduit à de mauvaises performances [4].

L'objectif de notre recherche est d'étudier la répartition d'énergie d'un véhicule électrique à l'aide de la technologie des réseaux de neurone artificiel, il se compose de trois chapitres :

Dans le premier chapitre, nous exposons l'état de l'art du véhicule électrique, les composants et les types de véhicules électriques. Ainsi que les caractéristiques des différentes sources d'énergies avec lesquelles le véhicule fonctionne, leur système de sécurité.

Dans le deuxième chapitre, nous nous intéressons à présenter la modélisation des différents éléments de la série de traction du VE qui composent notre propre système : batterie, pile à combustible, (convertisseur DC/DC et DC/AC), comme nous avons exposé le modèle du machine synchrone à aimant permanent MSAP.

Dans le troisième chapitre, nous présentons les différentes stratégies de commandes appliquée au véhicule électrique et particulièrement la commande vectorielle pour un MSAP, premièrement, nous avons utilisé des régulateurs PI pour contrôler le moteur MSAP où nous avons présenté les résultats de simulation qui ont été obtenus sous Environnement **MATLAB/SUMILINK**, deuxièmement, une étude de gestion de l'énergie sera présentée afin d'améliorer l'énergie fournie par la batterie utilisant la technologie de réseaux de neurone artificiel .Nous terminons ce chapitre par des résultats de simulation qui ont été étudiés et qui sont présentés dans ce système.

Enfin. Nous terminons cette étude par une conclusion générale et présenterons nos recommandations et points de vue pour la poursuite et l'amélioration de notre travail.

Chapitre I

*Généralités sur la Chaîne
d'Entrainement des Véhicules
Electriques*

I.1. Introduction

Le véhicule électrique est souvent perçu comme une technologie d'avenir et offre l'espoir de mettre fin à cette inquiétante pollution de l'atmosphère due au secteur du transport routier « la réduction des émissions de gaz à effet de serre, l'amélioration de la qualité de l'air », qui est capable de capter une large part de marché, mais ce n'est pas le cas. Cet échec est principalement dû à la concurrence, avec Technologie bien établie : le moteur à combustion interne, qui a bénéficié d'économies d'échelle, Réduction du coût du carburant et des subventions.

L'objectif de ce premier chapitre est de présenté un bref historique, l'état de l'art des véhicules électriques, la chaîne de traction, les sources d'énergie, les batteries ainsi que les chargeurs, les différents modes de charge et leur systèmes de sécurité.

I.2. Définition d'un Véhicule Electrique (VE)

Un véhicule est un ensemble de corps reliés entre eux par plusieurs liaisons visant d'une part à assurer le mouvement du châssis mais aussi le confort des passagers qu'il transporte. Il est composé d'un châssis, et d'un système de liaison au sol comprenant : les pneumatiques, les roues, les trains et les suspensions. La dynamique du système de direction n'est pas prise en compte et l'angle au volant est directement appliqué aux roues [5].

Un véhicule électrique VE est un véhicule dont la propulsion est assurée par un moteur fonctionnant exclusivement à l'énergie électrique. Contrairement aux véhicules à carburant, la force motrice est transmise aux roues par un ou plusieurs moteurs électriques selon la solution de transmission retenue [6].

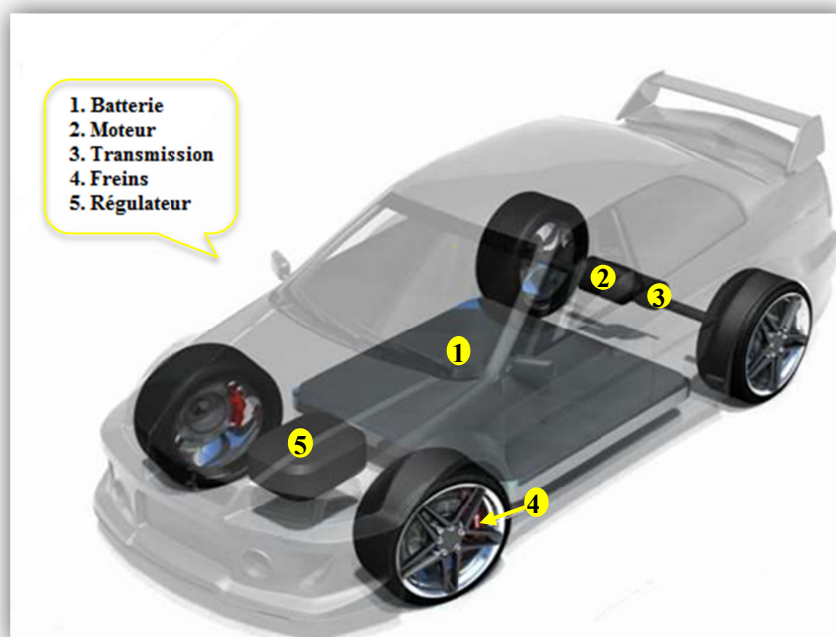


Figure I.1 Véhicule électrique (VE)

Compte tenu des progrès scientifiques et technologiques accomplis dans le domaine de l'électronique de puissance (les systèmes de gestion de l'énergie... etc...), beaucoup d'idées et de nouvelles conceptions sont explorées pour développer ce mode de propulsion. Le système de propulsion électrique a une architecture très simple. Il est constitué d'un actionneur électrique, un dispositif de transmission, et des roues (**Figure I.1**) [6].

I.3. Historique des Véhicules Electriques

Le premier véhicule électrique fit son apparition dans les années **1830 (1832-1839)**. La première personne à avoir inventé une voiture électrique fut **Robert Anderson**, un homme d'affaire écossais. Il s'agissait plutôt d'une carriole électrique. En **1859**, le français **Gaston Planté** inventa la batterie rechargeable au plomb acide, qui sera améliorée par **Camille Faure** en **1881**.

En **1899** en Belgique, une société construit "**La Jamais Contente**" la première auto électrique à dépasser les 100 km/h (elle atteindra les 105 km/h). L'auto était pilotée par le belge **Camille Jenatzy**, et munie de pneus Michelin. Elle était en forme de torpille [7].

Dès **1900**, la voiture électrique connaît ses beaux jours. Plus du tiers des voitures en circulation sont électriques. Dans les années **1920**, la faible autonomie des véhicules électriques, leur vitesse trop basse, leur manque de puissance, la disponibilité du pétrole, et leur prix deux fois plus élevé que les Ford à essence sont des facteurs mènent au déclin de la voiture électrique. En **1972**, **Victor Wouk**, le parrain du véhicule hybride construit la première voiture hybride, la Buick Skylark de GM (General Motors). Dès **1988**, le président de GM **Roger Smith** lance un fond de recherche pour développer une nouvelle voiture électrique qui deviendra la **EV 1** et qui va être produite entre **1996** et **1998** [7].

En **1997**, **Toyota** lance la Prius, la première voiture hybride à être commercialisée en série. 18000 exemplaires ont été vendus au Japon la première année et en **2006** Toyota a passé le cap des 500.000 unités vendues à travers le monde avec son célèbre véhicule hybride, la Prius. De **1997** à **2000**, de nombreux constructeurs lancent des modèles électriques hybrides : 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 [7].

En **2008** Tesla a démarré la production en série du premier véhicule, le **Roadster Tesla** (Figure I.2) [8].



Figure I.2 Le Tesla Roadster I

En 2010 et 2011, Toyota et EDF testent une nouvelle voiture hybride dérivée de la Prius, en vue d'une future commercialisation. L'expérimentation a lieu dans la ville de Strasbourg. Cette voiture essence hybride est rechargeable sur une prise électrique domestique, ce qui permet pour les petits trajets de rouler exclusivement à l'électricité, la propulsion essence étant dans ce cas réservée aux trajets plus longs.

En 2019, les grands constructeurs automobiles japonais annoncent tous de petits véhicules électriques susceptibles de casser la barrière de prix qui freine le développement de ce segment : nouvelle Honda E, Nissan IMk, petit modèle Toyota ultra-compact électrique à deux places destinées aux conducteurs débutants, aux personnes âgées et aux ruraux [9].

I.4. Chaîne de Traction des Véhicules Electriques

L'élément central des véhicules électriques qui les distingue des véhicules classiques est la chaîne de traction électrique qui utilise les accumulateurs pour le stockage d'énergie électrique, un convertisseur électrique (onduleur) qui permet de transformer le courant continu délivré par les accumulateurs en courant alternatif afin d'alimenter le moteur qui peut convertir l'énergie électrique embarquée en énergie mécanique.

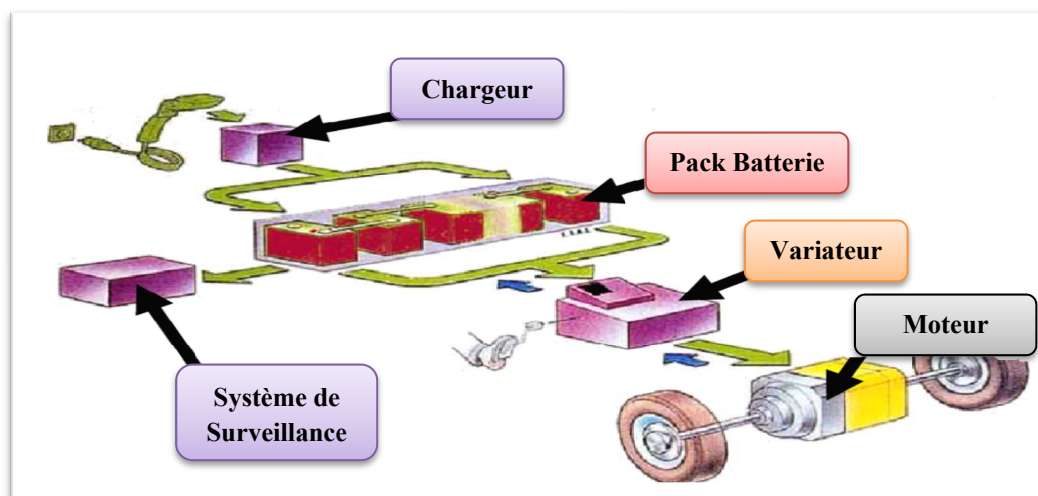


Figure I.3 Eléments Constituant un Véhicule Electrique

I.4.1. Source d'Energie Electrique**I.4.1.1. Unité de Stockage d'Energie****I.4.1.1.1. Batteries**

Les batteries sont des dispositifs de stockage qui consistent un ou plusieurs cellules électrochimiques qui convertissent l'énergie chimique stockée en énergie électrique. La capacité des batteries se mesure en ampère-heure (Ah) et l'énergie des batteries est mesurée en watt heures (Wh).

Les batteries ont été les principales sources d'énergie pour les véhicules électriques pendant une longue période de temps bien qu'au cours des dernières décennies, ils aient traversé d'importants changements à mesure que de nouvelles technologies de batterie ont été inventées et adopté.

Différents types de batteries avec différentes capacités et caractéristiques sont disponibles parmi ceux-ci: Batteries au plomb, batteries au nickel, batteries au zinc, batteries au lithium et batteries métal-air.

I.4.1.1.2. Super Condensateurs

L'ultra condensateur (UC) ou super condensateurs (SC) sont des condensateurs électrochimiques de densité de puissance élevée (par rapport aux autres dispositifs de stockage d'énergie). Ils sont constitués d'une double couche électrique et d'un séparateur. Les charges séparées fournissent une petite quantité d'énergie potentielle, aussi faible que 2-3 V. La double couche est constituée d'un matériau nano poreux, tel que l'actif-charbon qui peut améliorer la densité de stockage. Les valeurs de capacité des SC peuvent atteindre 3000 F. parmi ses caractéristiques : le fonctionnement sans entretien, sa longue durée de vie plus (500 000 cycles), l'insensibilité aux variations de température ambiante [10]. Taux élevé de charge/décharge et faible résistance interne et la bonne réversibilité [11].

Trois types des UC sont utilisés dans les véhicules électriques :

- ✓ Supers condensateurs électrochimiques.
- ✓ Les supers condensateurs aux électrodes à base des oxydes métalliques.
- ✓ Les supers condensateurs à base des polymères.

I.4.1.1.3. Stockage d'Energie du Volant

Les systèmes de stockage d'énergie à volant d'inertie (FES) conviennent à l'application de Véhicules électriques et systèmes d'alimentation grâce à l'électronique de puissance avancés et aux matériaux ingénierie [12]. Le volant d'inertie comprend un corps cylindrique tournant dans une chambre, des paliers couplés et un dispositif de transmission d'énergie, c'est-à-dire générateur/moteur montés ensemble avec un arbre commun [13]. L'énergie maintenue par le volant

d'inertie en rotation constante est convertie en énergie électrique par un dispositif de transmission.

Les avantages des FES par rapport aux autres formes de stockage pour l'utilisation des véhicules électriques peut être résumé comme suit: ils sont plus légers plus rapide et plus efficace pour absorber la puissance du freinage régénératif, ils sont économiquement abordables ils ont une longue vie, il n'y a pas d'effet de profondeur de décharge ; et théoriquement infini cycles de charge et de décharge [12].

Il existe deux types de FES : les systèmes FES haute et basse vitesse [13]. Un système FES à grande vitesse transmet l'énergie pour entraîner la charge via un générateur, alors qu'un système FES à basse vitesse reçoit de l'énergie pour être chargé à partir de la source d'alimentation via un moteur [14].

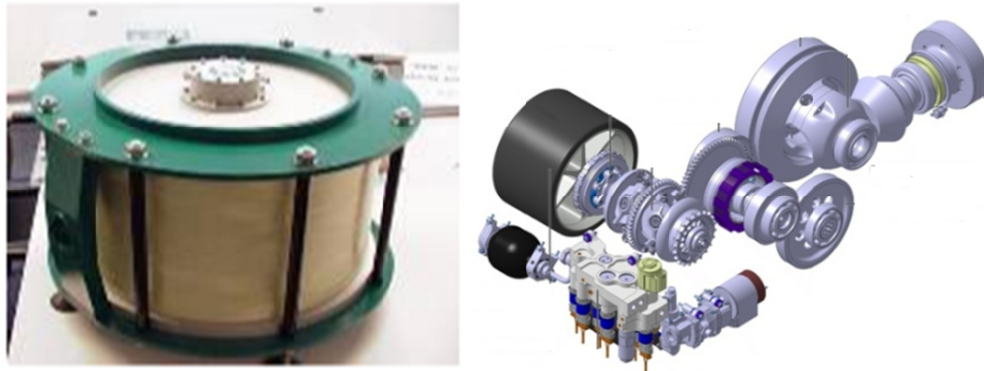


Figure I.4 Volants d'Inertie

I.4.1.2. Unité de Production d'Energie

Après avoir utilisé une batterie comme stockage d'énergie au lieu d'un réservoir de carburant, plus d'un générateur électrique peut être intégré dans le véhicule, afin d'étendre l'autonomie d'un véhicule. Plusieurs types de générateurs d'énergie, y compris les piles à combustible (PC), génératrice thermoélectrique d'automobile (GTEA), ainsi que le freinage régénératif.

I.4.1.2.1. Pile à Combustible

La pile à combustible (PC) génère de l'électricité par une réaction électrochimique, elle convertie l'énergie chimique en énergie électrique via le processus d'électrolyse.

La PC comprend des composants suivants : anode, une couche d'anode, un électrolyte, une cathode et une couche de catalyseur de cathode. La pile PC se compose de centaines cellules individuelles qui convertissent l'énergie chimique en énergie électrique. Cependant, le combustible n'est pas contenu dans l'électrode, mais fourni à l'électrode à partir d'un sous-système séparé. Tant que le carburant et oxydant sont fournis au PC en quantités suffisantes, la génération d'énergie électrique est assurée

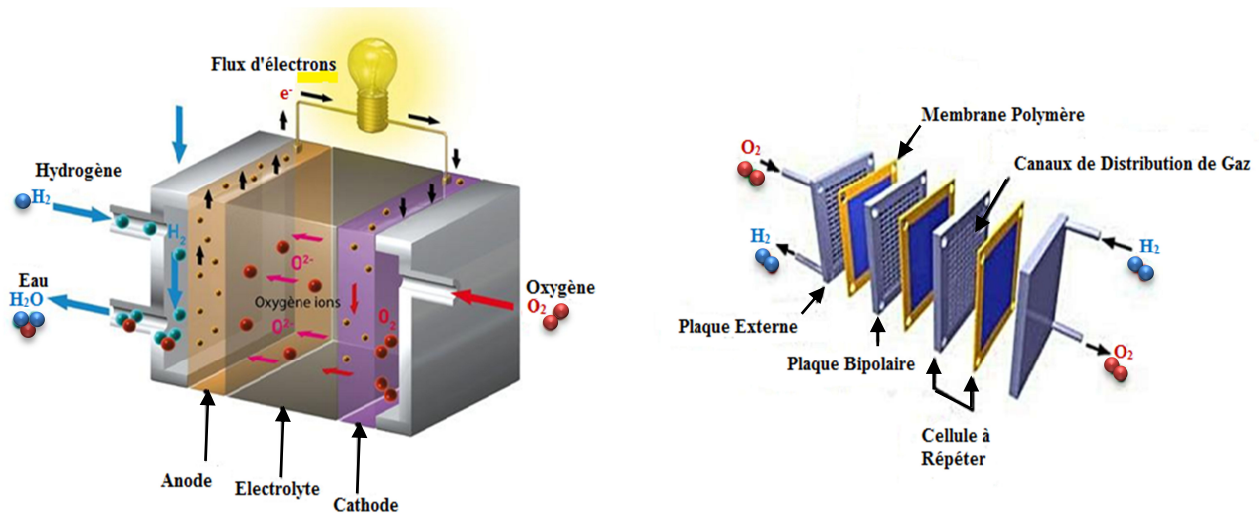


Figure I.5 Pile à Combustible

Il existe de nombreux types de PC :

- piles à combustible à méthanol direct (PCMD)
- pile à combustible à membrane électrolyte polymère (PCMEP)
- piles à combustible à acide phosphorique (PCAP)
- pile à combustible à carbonate fondu (PCCF)
- pile à combustible à oxyde solide (PCOS)

I.4.1.2.2. Générateur Thermoélectrique Automobile

Un générateur thermoélectrique automobile est un appareil qui convertit l'énergie thermique en électricité en utilisant Effet **Seebeck**. Il peut être utilisé pour les moteurs à combustion d'énergie interne (CEI) ou les VE, afin d'obtenir une économie de carburant optimale. Un GTEA typique se compose de quatre principaux éléments : un échangeur de chaleur côté chaud, un échangeur de chaleur côté froid, des matériaux électriques et un système d'assemblage par compression [15]. La durée de vie de l'GTEA est d'environ 10 à 20 ans sans maintenance avec faible capacité installée.

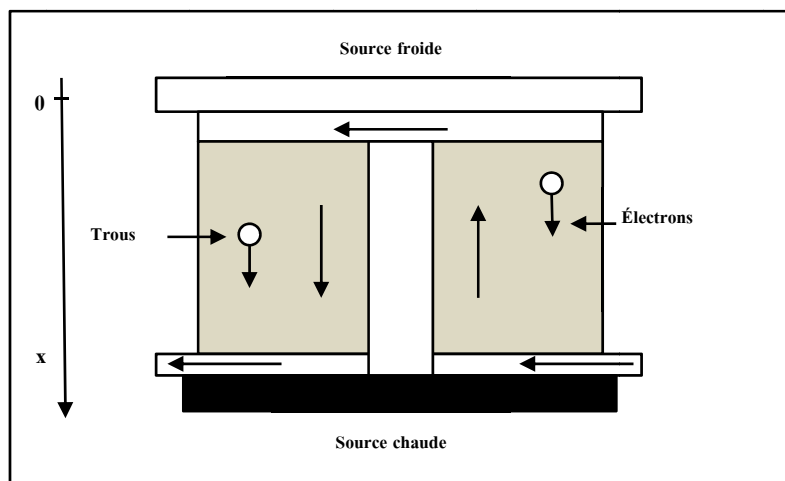


Figure I.6 Thermoélectricité

I.4.1.2.3. Freinage Régénératif

Le freinage régénératif est un mécanisme de récupération d'énergie qui ralentit un véhicule par l'utilisation de l'élan du véhicule pour récupérer l'énergie qui être autrement perdue pour les disques de frein sous forme de chaleur. Lorsqu'un véhicule est en roue libre et les modes de freinage, l'énergie cinétique d'une voiture en mouvement génère de l'électricité vers le côté alimentation, connu sous le nom de freinage régénératif.

Le freinage régénératif fonctionne avec le frein à friction dans un certain rapport lorsque le véhicule commence à ralentir. C'est parce que le système de freinage régénératif ne génère pas assez d'énergie pour arrêter le véhicule. Il sert également de but de sécurité du véhicule

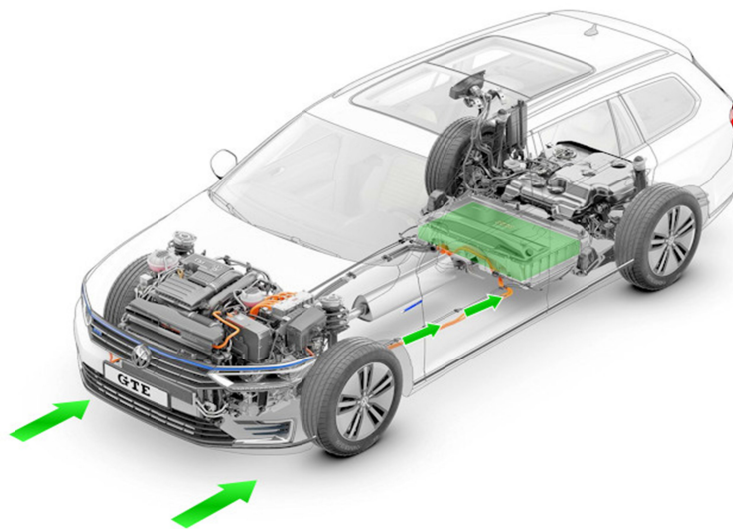


Figure I.7 Freinage Régénératif

I.4.2. Convertisseurs Statiques

Les convertisseurs électriques sont très importants dans un véhicule électrique, ils permettent la liaison entre la ou les sources et la machine de traction. Parmi ces convertisseurs : le hacheur, Onduleur et redresseur.

I.4.2.1. Redresseurs (AC-DC)

Les redresseurs sont des convertisseurs d'énergie qui transforme une source électrique à courant alternatif en une source électrique à courant continu. Nous pouvons distinguer : [16]

- **Des redresseurs à diodes** : ces convertisseurs établissent une relation rigide entre la tension continue de sortie et la tension alternative d'entrée.
- **Des redresseurs a thyristors** : qui permettent de faire varier de manière continu le rapport entre la tension continu récupérer à leurs bornes de sortie et la tension alternative appliquer à leurs bornes d'entrée en agissant sur l'angle d'amorçage des thyristors.

- **Des redresseurs mixtes** associant des diodes et des thyristors.
- **Des groupements de redresseurs à thyristors** destinés à améliorer les performances et à diminuer les perturbations.
- **Des redresseurs MLI** (Modulation de Largeur d'Impulsion) qui associent des IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) et des diodes.

Dans un véhicule électrique, les redresseurs sont utilisés pour transformer l'énergie électrique à courant alternatif fournie, soit par le réseau de distribution générale, soit par un alternateur placé à bord du véhicule et accouplé à un moteur thermique, en énergie électrique à courant continu qui peut être stockée dans une batterie d'accumulateurs électrochimiques.

I.4.2.2. Onduleurs (DC-AC)

C'est un Composant nécessaire dans un VE utilisant une machine de traction alternatif. Il permet de transformer l'énergie électrique à courant continu en une énergie électrique à courant alternatif et aussi de réaliser la commande du couple des moteurs et le réglage de vitesse. Il existe plusieurs structures pour ce type de convertisseur et la plus privilégiée pour les véhicules électriques reste celle de l'onduleur à six interrupteurs bidirectionnels constitués par l'association d'un IGBT et d'une diode montée en anti parallèle commandé selon une loi de type MLI qui présente des avantages importants tel le fait qu'elle peut repousser vers les fréquences élevées les harmoniques de la tension de sortie. Ce qui facilite le filtrage de celle-ci et permet aussi de faire varier le fondamental de cette dernière.

I.4.2.3. Hacheurs (DC-DC)

Un hacheur est un convertisseur de courant qui permet d'obtenir à partir d'une source de tension à courant continu de valeur sensiblement constante, des tensions et des courants contrôlés, réglables et adaptés aux besoins nécessaires à l'alimentation des divers récepteurs (capteurs, régulateurs, etc.). Dans un véhicule électrique, les hacheurs ont deux usages essentiels :

- Ils sont indispensables dans l'alimentation des moteurs de propulsion quand ceux-ci sont des moteurs à courant continu.
- Ils sont nécessaires pour adapter la tension de la batterie principale à celle des auxiliaires électroniques utilisés.

Ils sont constitués par l'association d'un MOSFET en parallèle à une diode.

I.4.3. Moteurs Electriques

Les moteurs électriques jouent un rôle crucial dans les technologies VE, car le moteur convertit l'énergie électrique de la batterie en énergie mécanique, qui permet au véhicule de se déplacer. Il agit également comme un générateur pendant l'action régénératrice qui renvoie l'énergie à la source d'énergie [17].

Au cours des dernières décennies, différents types de moteurs électriques ont été développés (AC et DC) afin de répondre aux besoins du secteur automobile, les moteurs à induction et à aimant permanent (PM) sont les types plus favorisés [18].

I.4.3.1. Moteurs à Courant Continu

Parmi les moteurs classiques utilisés dans les VEs, le MCC à excitation séparée qui représente la solution la plus économique grâce à son convertisseur de type hacheur de puissance agissant sur l'induit. L'inducteur est également alimenté par un hacheur de faible puissance. Il s'agit de la technologie utilisée par de nombreux constructeurs automobiles pour commercialiser les véhicules électriques de première génération. Mais le MCC présente un certain nombre d'inconvénients bien connus. Les attributs positifs des machines à courant continu sont les suivants :

- Facilite de contrôle due à la linéarité.
- Capacité de contrôle indépendant du couple et du flux.
- Technologie de fabrication établie.

Les inconvénients des machines à courant continu sont les suivants :

- Usure des brosses nécessitant un entretien élevé.
- Vitesse maximale faible.
- Faible rapport poids / puissance.

I.4.3.2. Moteurs à Courant Alternatif

Les moteurs à courant alternatif sont plus légers, moins coûteux, offrent un rendement beaucoup plus élevé par rapport aux MCC, une fiabilité plus grande, et ils ont également besoin de moins d'entretien que les moteurs à courant continu. Grâce à ces avantages, l'avancement récent en technologie a rendu les entraînements utilisant ces moteurs beaucoup plus préférables que ceux traditionnels avec des moteurs à courant continu. Puisque ces avantages sont d'importance primordiale pour un système de traction de véhicule électrique, il existe deux principaux types de moteurs peuvent se discerner [19] :

- ❖ le moteur asynchrone
- ❖ le moteur synchrone

I.4.3.2.1. Moteur Asynchrone à Induction

Les moteurs à induction se caractérisent par la simplicité de construction, la fiabilité, la robustesse, la maintenance réduite, le cout réduit et peuvent fonctionner dans des environnements hostiles. L'absence de friction des balais permet aux moteurs de relever la limite de vitesse maximale, et la vitesse nominale plus élevée permet à ces moteurs de développer un rendement élevé. Les variations de vitesse des moteurs à induction sont obtenues en modifiant la fréquence de

la tension. Le contrôle d'orientation de champ (Field orientation control) d'un moteur à induction (MI) peut découpler le contrôle du couple et le contrôle du champ [20].

I.4.3.2.2. Moteur Synchrone

Dans cette catégorie, on trouve plusieurs sortes de configurations dont nous citons les plus fréquentes [19] :

- **Moteur Synchrone à Aimants Permanents (MSAP)**

Le moteur synchrone à aimant permanent (MSAP) peut être considéré comme un croisement entre un MI et un MCC sans balai. Ils ont des structures de rotor similaires aux moteurs MCC qui contiennent des aimants permanents. Les avantages de MSAP sont bien connus. Le plus gros avantage est le faible volume des MSAP, contrairement aux autres types de moteurs, cela les rend parfaitement adaptés aux applications de moteurs à roues [20]. Les commandes des moteurs MSAP présentent les inconvénients en ce que l'aimant est coûteux et que la résistance mécanique de l'aimant rend difficile l'établissement d'un couple élevé dans le moteur. Les moteurs CC sans balai à aimant permanent ne disposent pas de balai pour limiter la vitesse, mais des questions subsistent quant à l'intensité de fixation de l'aimant, car elle limite la vitesse maximale si les moteurs sont du type à rotor intérieur. De plus, ce moteur souffre d'une assez limitée capacité d'affaiblissement du champ. Ceci est dû à la présence du champ magnétique permanent qui ne peut être affaibli que par la production d'un composant de champ stator qui oppose le champ magnétique du rotor [20]. Néanmoins, un fonctionnement prolongé à puissance constante est possible grâce à la progression de l'angle de commutation.

- **Moteur à Réductance Variable (MRV)**

Le rotor de ce type de moteur ne contient ni aimants, ni bobinage d'excitation. Le couple est créé seulement grâce à l'effet réductance. Le stator est semblable à celui de la majorité des machines à courant alternatif. Les inconvénients pour ce type de machine se résument par la délicatesse de la fabrication à cause de la nécessité d'un rapport de saillance élevé, la faiblesse du facteur de puissance et la complexité de l'électronique de commande nécessitant un capteur de position. Les principaux avantages de ces machines sont la possibilité de fonctionnement à vitesse élevée et le rendement relativement élevé par rapport à la machine asynchrone.

1.4.3.3. Comparaison entre quatre Types d'Entraînement

Le choix le plus approprié pour les VE parmi quatre types d'entraînement est déterminé en fonction des facteurs suivants : facteurs d'efficacité, poids et coût. Tableau récapitulatif ci-dessous des caractéristiques de quatre types d'entraînement pour véhicules électriques.

Table I.1: Comparaison des quatre Moteurs [20]

	MCC	MI	MRV	MSAP
Efficacité	Moyenne	Élevée	Élevée	Élevée
Poids	Moyenne	Moyenne	Faible	Élevée
Cout	Faible	Moyenne	Élevée	Élevée

Le tableau indique que les entrainements à base des MCC continueront à être utilisés dans les VE car les MCC sont disponibles au cout le plus bas. Du point de vue de l'efficacité, les motorisations MSAP sont le meilleur choix [20].

I.5. Principaux Types des Véhicules Electriques

Les véhicules électriques peuvent soit fonctionner à propulsion électrique, soit fonctionner avec un moteur à combustion interne. La puissance motrice est auxiliaire provient de la puissance stockée dans l'unité de stockage d'énergie, qui est rechargée à partir de l'électricité du réseau et la récupération d'énergie au freinage. L'électricité, nécessaire au déplacement des véhicules, peuvent provenir de centrales de production ainsi que des sources d'énergies renouvelables et stocké dans des batteries, des piles à combustible (PAC) et des supers condensateur (SC). Contrairement à véhicules conventionnels, le VE utilise une source d'alimentation plus efficace [21].

Le mélange de batterie, les capacités, les capacités de charge et la complexité technologique donnent aux consommateurs un choix d'options en ce qui concerne les gammes de véhicules, le ravitaillement choix et prix. Ceux-ci peuvent être classés :

- Véhicule électrique à batterie (VEB)
- Véhicule électrique hybride (VEH)
- Véhicule électrique hybride rechargeable (VEHR)
- Véhicule électrique à pile à combustible (VEPC)

Le VEB est alimenté uniquement par l'électricité de l'unité de stockage d'énergie, tandis que sa propulsion est assurée par un moteur électrique. Le système de conduite de VEH combine le moteur électrique et le moteur thermique, tandis que la puissance des sources implique à la fois l'électricité et l'essence ou le diesel. Le VEPC est piloté par un moteur électrique et pourrait être alimenté directement ou indirectement à l'aide hydrogène, méthanol, éthanol ou essence.

I.5.1. Véhicules Electriques à Batterie

Dans les véhicules électriques à batterie, un moteur électrique alimenté par une batterie remplace le moteur à combustion interne et le réservoir [22]. Pour être plus précis, les VEB ou tout électrique véhicules électriques consistent en un tric drive et une batterie électrique pour le stockage

de l'énergie, le convertisseur DC/DC ajuste la tension du courant électrique fourni à un convertisseur à 2 quadrants ou un convertisseur bidirectionnel à 4 quadrants avec alimentation dédiée contrôleur électronique, qui contrôle la puissance fournie au moteur (et depuis, en cas de capacité de régénération, c'est-à-dire un convertisseur à 4 quadrants). Le hacheur à 4 quadrants utilise l'inertie pour la régénération (recharging) pendant la décélération et le freinage. La batterie est normalement rechargée via une prise et un chargeur de batterie, qui peuvent soit être transportés à bord ou installé au point de charge. Les grandes batteries peuvent être rechargé par freinage régénératif sur l'entraînement et chargé en externe lorsque le véhicule s'arrête. Deux types de BEV, selon le mode de transmission de la puissance électrique développée par le moteur électrique vers la roue motrice, peut être discerné :

(1) dans le premier type le moteur électrique remplace l'CEI classique. La puissance produite par le moteur électrique est transmise aux roues via la transmission (boîte de vitesses). L'utilisation de cette dernière entraîne une diminution du rendement global (due aux frottements inhérents au mécanisme) [23].

(2) Dans le deuxième type, chaque roue motrice est équipé d'un moteur électrique (moteur moyeu)

1.5.2. Véhicule Electrique Hybride (VEH)

On introduit la notion de véhicule hybride lorsqu'un véhicule à moteur électrique embarque plusieurs sources d'énergies supplémentaires "Batterie et pile à combustible ou super condensateur". L'hybridation est aussi l'association à la fois d'un moteur électrique et un moteur à combustion interne, le second à essence ou diesel. Le moteur à combustion interne est dominant et le moteur électrique ne sert que de complément. Le véhicule est donc équipé d'une batterie plus petite, et le moteur à combustion assure l'alimentation avec l'énergie provenant du freinage par récupération. Contrairement aux BEV, cette batterie ne peut pas être rechargée via une prise de batterie, car sa capacité est petite et les voitures hybrides ne sont pas équipées d'une telle prise [23]. Nous identifions trois principaux types de HEV.

1) La voiture hybride parallèle est le premier type, qui utilise simultanément le moteur à combustion interne et le moteur électrique pour alimenter la voiture. Cela signifie que les deux types peuvent entièrement mettre les roues du véhicule en mouvement [24].

2) Le deuxième type de HEV est le véhicule dit hybride série. La voiture est à nouveau équipée de moteurs à combustion interne et électrique. Cependant, dans ce cas, le moteur à combustion seule ne peut pas mettre le véhicule en mouvement, car sa fonction ici est uniquement de générer de l'énergie, lorsque la batterie du véhicule s'épuise [24]. Par conséquent, le moteur à combustion porte le nom et à la fonction d'un prolongateur d'autonomie.

3) Le troisième type de HEV est le véhicule dit à double train. Le principe est que chaque essieu moteur est alimenté différemment, l'un par la combustion et le second par un moteur électrique. L'essieu moteur à combustion interne comprend la boîte de vitesses, tandis que le deuxième essieu moteur, celui à moteur électrique, n'a pas de boîte de vitesses. [24]

I.5.3. Véhicule Electrique Hybride Rechargeable (VEHR) ou Plug-In

Les VEHR sont définis comme des VEH qui ont un système de stockage de batterie de 4 kWh ou plus, un moyen de recharger la batterie à partir d'une source externe, et la capacité de parcourir au moins 16 km en mode électrique [25]. Le concept de VEHR a été développé, afin d'étendre les tout électriques gammes de VEH [26]. En fait, un VEHR est similaire dans son concept à un VEH, mais avec une batterie plus grande et une connexion au réseau. La connexion au réseau permet de recharger la batterie en électricité et la plus grande taille de la batterie permet à la voiture de parcourir une distance significative en mode tout électrique.

Le VEHR utilise à la fois un CEI et un groupe motopropulseur électrique, néanmoins le VEHR utilise la propulsion électrique comme force motrice principale. Pour cette raison, les VEHR nécessitent une batterie plus grosse que les VEH. En fonction de l'état de charge (SOC) de la batterie. Ils peuvent être une solution viable pour la création d'un véhicule à faible émission de carbone. Système de transport à condition que le mix électrique provienne d'alternatives principales sources d'énergie [27].

I.5.4. Véhicules Electriques à Pile à Combustible(VEPC)

Les VEPC sont des VE par conséquent, ils partagent un groupe motopropulseur similaire avec les VEB à l'exception de la source d'énergie qui est une pile PC. Ils sont alimentés par l'électrolyse, l'eau et la chaleur étant les seuls sous-produits de cette production, les VEPC sont des véhicules à zéro émission et peuvent être considérés comme une solution fiable pour un secteur des transports zéro carbone. Les VEPC transportent l'hydrogène dans des réservoirs spéciaux à haute pression montés dans le véhicule, tandis que l'oxygène nécessaire à la production d'électricité provient de l'air d'environnement [28].

Tableau suivante résumé les principaux caractéristiques des VEs

Tableau I.2 Principales caractéristiques des véhicules électriques.

Types d'EVs	VEB	VEH	VEPC
Source d'énergie	1. Batterie	1. Batterie, SC ou PC 2. Combustion interne moteurs	1. Pile à combustible
Technique de propulsion	1. Entraînements par moteur électrique	1. Entraînements par moteur électrique 2. Moteurs à combustion interne	1. Entraînements par moteur électrique
Caractéristiques et fonctionnalités	1. Zéro émission Co ₂ 2. Autonomie courte 3. Coûts initiaux plus élevés	1. Faible émission Co ₂ 2. Portée plus longue 3. Complexe	1. Zéro émission Co ₂ 2. Autonomie moyenne 3. Coûts initiaux les plus élevés
Techniques majeures	1. Contrôle du moteur électrique 2. Gestion de la batterie 3. Dispositif de charge	1. Contrôle du moteur électrique 2. Gestion de la batterie 3. Gérer plusieurs sources d'énergie 4. Efficacité optimale du système 5. Dimensionnement des composants	1. Processeur de carburant 2. Système de ravitaillement
Freinage récupératif	Oui	Oui	Oui
Problèmes majeurs	1. Dimensionnement et gestion de la batterie 2. Installations de recharge 3. Coût 4. Durée de vie de la batterie	1. Dimensionnement et gestion de la batterie 2. Contrôle, optimisation et gestion des énergies multiples sources	1. Coût PC, cycle de vie et fiabilité 2. Infrastructures de production et de distribution d'hydrogène 3. Coût

I.6. Recharge des Véhicules Electriques

La charge des véhicules électriques peut être utilisée via des systèmes CC ou CA. Différentes configurations de courant et de tension pour la charge, mentionnées comme "Niveaux" déterminent le temps nécessaire pour une charge complète. Ces niveaux varient dans chaque pays en fonction de la fréquence, de la tension, du raccordement au réseau électrique, et les normes de transmission. La recharge sans fil a également été étudiée.

I.6.1. Principe de Chargeur

Les chargeurs de batteries sont spécifiques au type d'alimentation électrique, c'est-à-dire monophasée ou triphasée, à leur emplacement et au mode de transmission de l'énergie. Dans le cas d'une alimentation par courant alternatif, la charge s'effectue généralement en deux étapes [29].

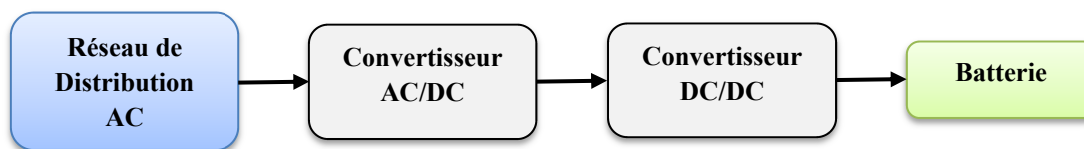


Figure I.8 Synoptique des Etapes de Conversion d'un Chargeur

Le tableau I.2. Donne une estimation du temps de recharge selon les sources d'alimentation [29].

Tableau I.3 Temps de charge des batteries. [29]

Durée de Recharge	Alimentation	Tension	Courant max	Niveaux 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 VDC	100 à 125 A	

I.6.2. Types de systèmes de recharge

Actuellement, la charge des batteries des VEs se fait par méthode de charge conductrice, méthode de charge inductive et échange de batterie [30].

I.6.2.1. Charge Conductrice

La charge est réalisée grâce à une connexion directe par câble entre l'alimentation et la batterie. Il se compose d'un redresseur et convertisseur avec une certaine correction du facteur de

puissance et ils sont classés comme chargeurs embarqués et non embarqués. Le chargeur embarqué, qui est intégré dans le véhicule, contient le redresseur et le système de régulation de la batterie, alors que dans le chargeur externe, ces systèmes sont placés sur le chargeur station. La charge conductrice est disponible dans la Nissan Leaf, Tesla Roadster et Chevy Volt [31].



Figure I.9 Charge Conductrice

I.6.2.2. Charge inductive

La charge inductive, également connue sous le nom de charge sans fil, utilise un champ électromagnétique pour transférer de l'électricité à une batterie de VE. L'avantage de la charge inductive est qu'il assure la sécurité électrique dans toutes les conditions météorologiques. Néanmoins cette technologie n'est pas actuellement disponible pour les véhicules électriques commerciaux en raison de problèmes de santé [32].

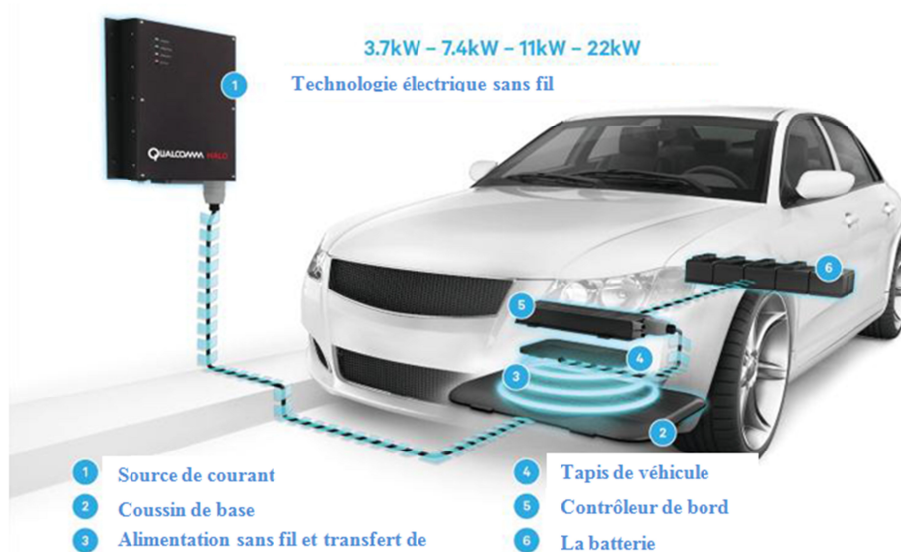


Figure I.10 Charge Inductive

I.6.2.3. Changement de batterie

L'échange de batterie est un schéma qui est utilisé, de sorte que les utilisateurs peuvent échanger leur batterie vide avec une batterie complètement chargée à partir d'une station d'échange de batterie (BSS). Les BSS présentent plusieurs avantages, tels que la longue durée de vie de la batterie, moins de temps somme, et un coût relativement minime à gérer, étant donné que les batteries sont collectés et gérés dans des emplacements centralisés. Différente techniques de charge sont disponibles pour charger une batterie de VE. Charge conventionnelle les méthodes sont le courant constant (CC), la tension constante (CV), le CP, le cône charge et charge d'entretien [33].



Figure I.11 Changement de Batterie

I.6.3. Modes de Connexion des Chargeurs pour VE

Une norme internationale (norme IEC 61851-1 *Electric Vehicle Conductive Charging System*), en cours de finalisation définit quatre modes de connexion pour recharger le véhicule, comme suit [29]:

Mode 1 : Prise domestique

Le VE est branché au réseau d'alimentation à l'aide d'une prise normalisée (intensité standard jusqu'à 16 A). Adapté pour les petites puissances de charge pour les VEH et les anciennes générations de VE. L'installation électrique est équipée d'une prise de terre, un disjoncteur contre surcharges et une protection différentielle [29].

Mode 2 : Prise domestique et câble équipés d'un dispositif de protection

Il possède les mêmes propriétés que le premier mode, amélioré d'un boîtier de contrôle intégré au câble pour une meilleure sécurité. Un VE peut être rechargé en mode 2 avec une installation en mode 1. Cette configuration est considérée comme un mode dégradé de transition ou de dépannage, réservée à des applications de puissance inférieure ou égale à 3 kW. Du fait de la spécificité du câble, cette solution est particulièrement coûteuse [29].

Mode 3 : Prise spécifique sur un circuit dédié

Le véhicule est relié au réseau électrique via un socle (Wall box), une prise électrique et un circuit dédié. Equipé d'un quatrième fil entre la borne et le véhicule afin de garantir la continuité avec la terre et permettre au véhicule de dialoguer en permanence l'infrastructure. Une fonction de contrôle et de protection est installée en permanence dans l'installation. En effet, avant d'enclencher la recharge, le système de contrôle vérifie que le véhicule est bien connecté, que la masse est reliée

au circuit de protection de l'installation et que les puissances entre le câble, le véhicule et le circuit de charge sont cohérentes [29].

Mode 4 : Connexion courant continu

Le VE est branché indirectement au réseau de distribution par le biais d'un chargeur externe. Tout comme pour le mode 3, il est également équipé d'une fonction de contrôle et de charge [29]. Ce mode est dédié à la recharge rapide continue la figure illustre ces quatre modes :

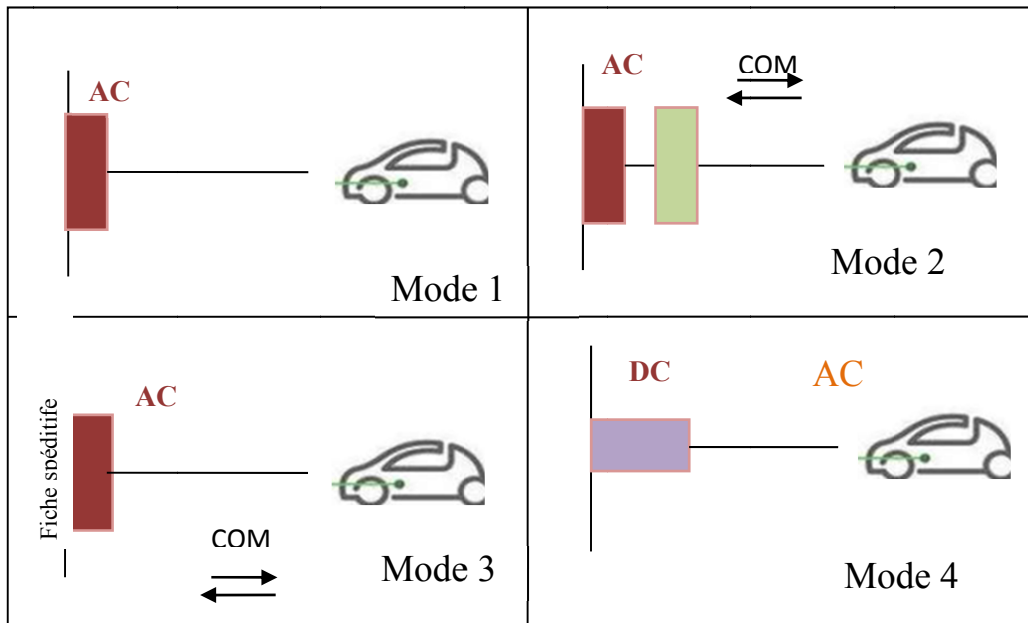


Figure I.12 Modes de Connexion. [29]

I.7. Systèmes de Sécurité

Les voitures électriques représentent une nouvelle technologie, introduisant des composants électriques à bord du véhicule, et les différents risques associés doivent être rigoureusement recensés. Pour la sécurité liée aux voitures électriques, plusieurs aspects sont à prendre en considération [34].

I.7.1. Protection Contre les Chocs électriques

- **Protection Contre le Contact Direct :** Protection des personnes contre tout contact direct avec les parties électriques actives du système de traction qui doit être assuré par une isolation adéquate et par une position inaccessible de ces parties.
- **Protection Contre le Contact Indirect :** Le problème de contact indirect est souvent lié aux problèmes de structure. Un contact entre le circuit de traction et la structure peut conduire à des situations dangereuses telles que :
 - Les court-circuit

- Électrocution
- Comportement imprévu et/ou incontrôlé du véhicule [34].

I.7.2. Sécurité de la Batterie

Pour une voiture électrique, la batterie représente le composant le plus important, mais elle est à l'origine de plusieurs phénomènes dangereux tels que des phénomènes dangereux électriques, mécaniques, chimiques, sans oublier le risque d'explosion [34].

I.7.3. Risque Electrique

- **Protection contre électrocution:** Le boîtier des batteries doit être renforcé en cas de besoin,
- **Protection contre les Court-Circuits:** Les batteries de traction ont des courants de court-circuit considérablement élevé, or, des dispositifs de sécurité tel que des fusibles sont à mettre en place, notamment au centre électrique de la batterie [34].

I.7.4. Sécurité des Opérations de Chargement des Batteries

Durant le chargement de la batterie, la voiture se trouve connectée au réseau principal d'électricité, donc des mesures de prévention doivent être prises pour éviter le risque d'électrocution. Ces mesures de prévention dépendent principalement du type de chargeur externe ou embarqué [34].

I.8. Technologie Véhicule-Réseau (V2G)

Véhicule-au-réseau (Véhicule-to-grid V2G) fait référence à la technologie de flux bidirectionnel de l'électricité entre le VE et le réseau. La technologie V2G décrit un système dans lequel les véhicules électriques communiquent avec le réseau électrique pour répondre aux services en retournant l'électricité au réseau ou en limitant leur taux de charge [35]. Le stockage V2G offre la possibilité de stocker et d'évacuer l'électricité produite à partir des sources d'énergies renouvelables telles que le solaire et le vent, avec une production qui fluctue en fonction de la météo et l'heure de la journée [36].

Les services V2G sont bénéfiques à la fois pour les propriétaires de véhicules électriques et pour les réseaux électriques, car ils peuvent contribuer à augmenter les performances d'un réseau d'approvisionnement en termes de Efficacité, fiabilité, stabilité et répartition de la production et de la distribution réseaux [37]. Les véhicules électriques peuvent servir à la fois de distribué et de charge en tant que périphérique de stockage. Lorsque les véhicules électriques sont attachés au réseau de distribution, la batterie d'un véhicule peut être utilisée pour fournir de l'énergie à un réseau aux heures de pointe de charge et ainsi renforcer la fiabilité d'un système. De plus, les systèmes V2G peuvent fournir un support de tension suffisant pour sous- modérer en conséquence

l'utilisation des régulateurs de tension sur les réseaux de distribution [38]. De plus, le V2G réduit les pertes de ligne de la distribution, minimise la chute de tension et ajoute un relais de protection [39].

En résumé, on peut affirmer que le V2G la technologie a non seulement le potentiel de stabiliser les réseaux [40]. Mais aussi réduire les coûts d'exploitation et améliorer la sécurité des réseaux de distribution [41].

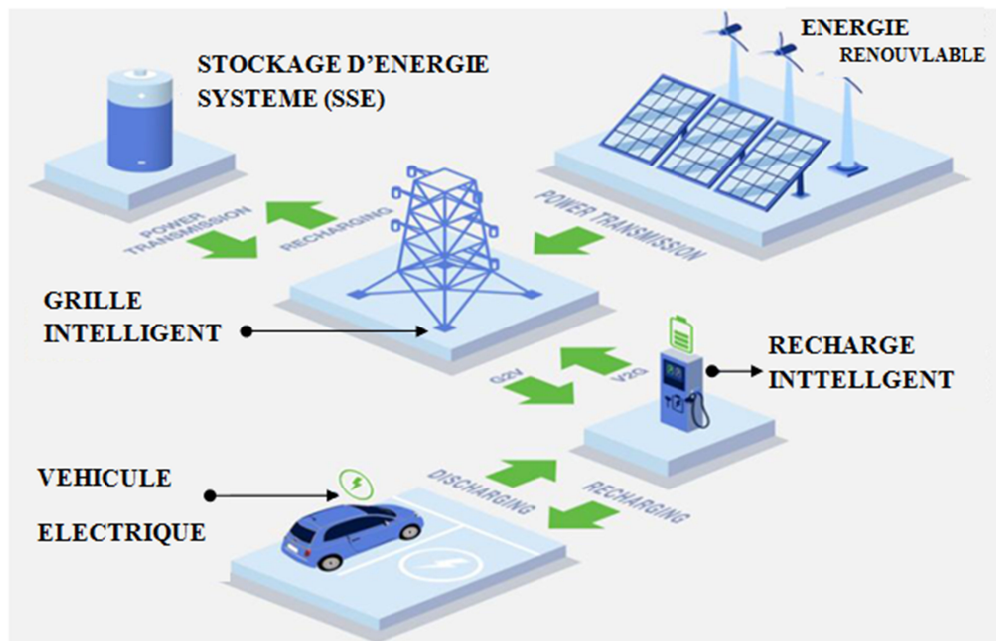


Figure I.13 Véhicule-au-réseau (V2G)

I.9. Avantages et Inconvénient des VE

Avantages du VE

La voiture électrique possède plusieurs avantages qui permet aux consommateurs de faire la différence entre les véhicules électriques et les véhicules thermiques :

- Les véhicules électriques sont agréables à conduire, avec un roulement qualifié de « doux » en raison d'une accélération continue et progressive car le moteur ne cale jamais (absence d'embrayage).
- Ces véhicules sont plus faciles d'entretien et leurs dépenses sont réduites de 30 à 40 % (par exemple le moteur électrique ne requiert pas de vidange). De plus, les occasions de pannes sont 3 fois moins nombreuses.
- Le moteur électrique a un rendement énergétique 3 fois plus élevé que celui d'un moteur thermique.
- Le démarrage est très rapide, il suffit d'appuyer sur un bouton pour quelle se mette en marche (fini les problèmes de démarrages pendant les temps froids d'hiver).
- Le principal avantage est l'indépendance vis-à-vis du pétrole.

Inconvénients du VE

Comme la voiture électrique possède plusieurs avantages, elle a aussi des malle-faits :

- D'autant que comme les produits innovants ont un coût souvent élevé, le prix de ces voitures devrait être élevé.
- Ainsi la durée de recharge des batteries électriques est encore importante. De plus, lors de l'utilisation, le moteur électrique ne produit pas de chaleur. L'habitacle de la voiture n'est pas chauffé. Pour un meilleur confort (climatisation, radio, etc.), la décharge des batteries est accélérée.
- La durée de vie de la batterie et la puissance du moteur électrique ne sont pas encore très importantes [42].

I.10. Conclusion

Actuellement, le monde est dans une transition énergétique vers une réalité future à faible émission de carbone, nature des systèmes de transport ainsi que leurs infrastructures connectives devront également s'adapter. Avec des contraintes de plus en plus fortes sur ressources énergétiques et les préoccupations environnementales, les véhicules électriques attireront plus d'intérêt de l'industrie automobile et du consommateur.

Dans ce chapitre nous avons présenté un bref aperçu de l'état de l'art de véhicule électrique. Les différents éléments constituant une chaîne de traction ont été présentés comme les batteries et les moteurs électriques, ainsi que les différentes architectures de la motorisation et les technologies de convertisseurs statiques utilisés. Cela nous a permis de faire une synthèse afin de choisir les composants adéquats à une chaîne de traction pour notre étude. Le chapitre suivant est consacré à la modélisation dynamique du véhicule électrique et principalement le moteur synchrone à aimant permanent.

Chapitre II

Modélisation des Constituants de la Chaîne d'Entrainement des Véhicules Electriques

II.1. Introduction

La modélisation de la dynamique des VEs est critique, Afin de comprendre les phénomènes qui régissent leur fonctionnement complexe, il est nécessaire d'étudier les sous-systèmes qui les composent [43]. Les progrès enregistrés dans l'informatique et du génie des logiciels permettent de réaliser des modélisations performantes qui nous permettent d'envisager même un travail d'optimisation.

L'objectif de cette deuxième partie de notre travail est la modélisation de la chaîne de traction de notre véhicule électrique qui alimenté par un système de génération d'électricité. Cette génération utilise deux sources, tel que les piles à combustible et les batteries. L'électricité provenant des sources via des convertisseurs de puissance assure une disponibilité continue d'énergie pour la machine synchrone à aimant permanent afin de garantir la traction du véhicule.

II.2. Principe de Fonctionnement d'un Véhicule Electrique

Les véhicules électriques sont dotés d'une batterie qui stocke l'énergie et se recharge grâce à l'électricité du réseau, d'un ou plusieurs moteurs électriques avec un système de contrôle et d'un chargeur de batterie. La batterie est connectée au moteur électrique par l'intermédiaire d'un régulateur et d'un convertisseur. Le régulateur sert à régler l'intensité du courant qui alimente le moteur. Son fonctionnement est assez simple lorsque le conducteur du véhicule appuie sur la pédale de l'accélérateur la batterie libère du courant. Le convertisseur transforme alors le courant continu(DC) de la batterie en courant alternatif (AC) pour alimenter le moteur (cas d'un moteur Alternatif).Le convertisseur est une partie intégrante du moteur. Le point fort du véhicule électrique est la chaîne de transmission électromécanique. En effet, un véhicule a besoin d'un couple élevé à basses vitesses afin de pouvoir accélérer et d'un couple moins important à des vitesses de croisière. Ces spécificités sont celles d'un moteur électrique [44].

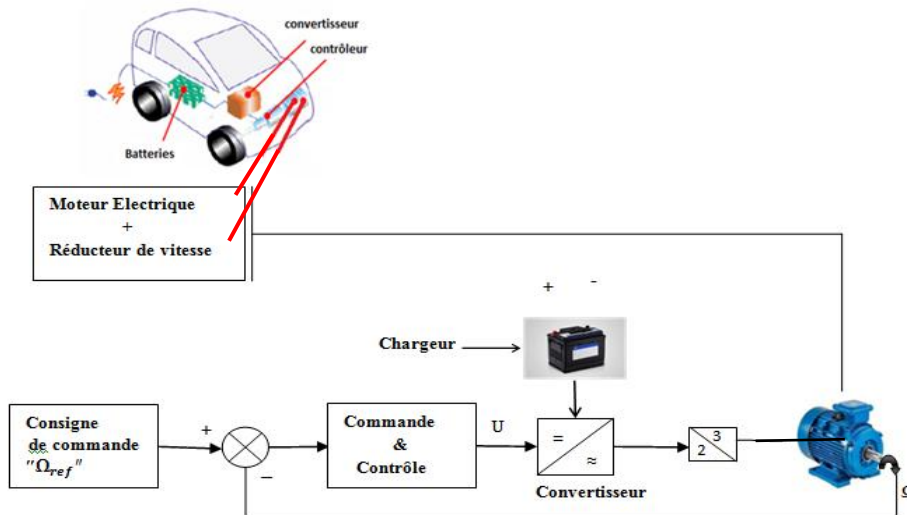


Figure II.1. Fonctionnement d'un Véhicule Electrique

II.3. Modèle Dynamique du Véhicule

Le système de propulsion produit une énergie mécanique supposée être stockée momentanément dans le véhicule. Les résistances motrices sont supposées drainer l'énergie de ce réservoir. L'énergie dans le véhicule est stockée :

- sous forme d'énergie cinétique lorsque le véhicule est accéléré.
- sous forme d'énergie potentielle lorsque le véhicule atteint des altitudes plus élevées.

La quantité d'énergie mécanique fournie par un véhicule lors de conduit dépend principalement de trois effets :

- les pertes de friction aérodynamiques.
- les pertes par frottement de roulement.
- l'énergie dissipée dans les freins.

L'équation élémentaire qui décrit la dynamique longitudinale d'un véhicule routier a la forme suivant

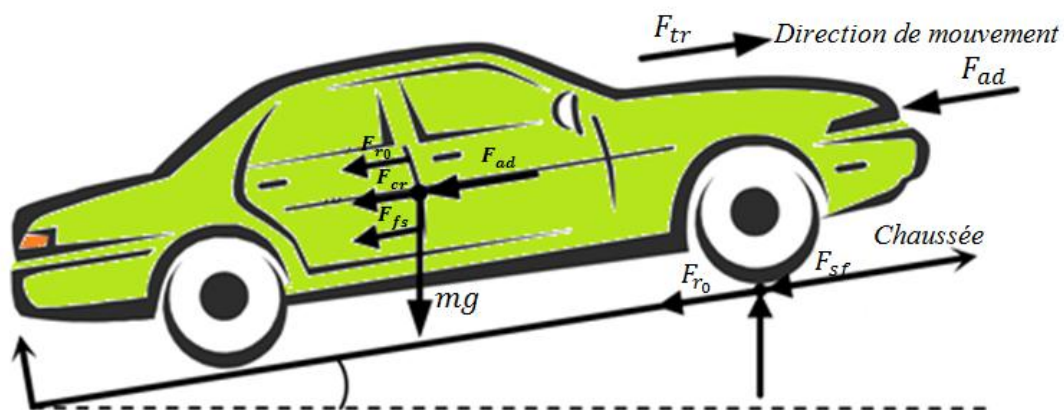


Figure II.2. Représentation de différentes forces agissant sur un véhicule en mouvement

La Force de résistance totale est donné par:

$$F_T = F_{r_0} + F_{ad} + F_{cr} + F_{sf} \quad (\text{II.1})$$

F_{ad} : Trainée aérodynamique

F_{sf} : Force de Stokes ou de frictions visqueuses

F_{r_0} : Force de résistance au roulement

F_{cr} : Force de résistance de la pente

II.3.1. Force de Résistance au Roulement F_{r_0}

$$F_{r_0} = C_d . m . g . \cos(\alpha) \quad (\text{II.2})$$

m : Masse du véhicule (K_g).

g : Accélération gravitationnelle (m / s^2)

C_d : est le coefficient de résistance au roulement des pneus, il réunit toutes les propriétés et les phénomènes physiques qui existent entre le pneu et le sol.

II.3.2. Trainée aérodynamique F_{ad}

$$F_{ad} = \frac{1}{2} \rho C_f A_f (V_r)^2 = \frac{1}{2} \rho C_f A_f (V + V_w)^2 \quad (\text{II.3})$$

ρ : Masse volumique (densité de l'air) ($\rho = 1.293 k_g / m^3$)

C_f : Coefficient de frottement aérodynamique de pénétration dans l'air.

A_f : Surface frontale du véhicule (m^2).

V_r : Vitesse relative du véhicule [m / s]

V : vitesse du véhicule [m / s]

V_w : Vitesse du vent [m / s]

II.3.3. Force de Résistance de la Pente F_{cr}

$$F_{cr} = \pm m . g . \sin(\alpha) \quad (\text{II.4})$$

II.3.4. Force de Stokes ou de Frictions Visqueuses F_{sf}

$$F_{sf} = k_a V_r \quad (\text{II.5})$$

k_a : Coefficient de stokes.

Dans littératures les chercheurs utilisent par fois la force d'accélération du véhicule F_a au lieu de la force de frictions visqueuses F_{sf} avec [45]

$$F_a = m \lambda \frac{dV_r}{dt} = [m + \sum J(i_r^2) \frac{dV_r}{dt}] \quad (\text{II.6})$$

Où λ facteur de masse avec $\lambda \in [1.06; 1.34]$, qui dépend de la vitesse engagée. J Est le moment d'inertie au niveau de la circonférence de la roue motrice, i le rapport de la boîte de vitesse et r la rayon de la roue.

Le moteur électrique assure la force de traction d'un véhicule électrique qui doit surmonter la charge de la route. L'équation du mouvement est alors donnée par :

$$k_m m \frac{dv}{dt} F_{tr} - F_T \Leftrightarrow m_i a = F_{tr} - F_T \quad (\text{II.7})$$

F_{tr} : Force de traction des pneus.

k_m : Coefficient d'inertie rotationnelle (facteur de masse).

$m_i = k_m m$: Masse d'inertie du véhicule.

a : Accélération du véhicule.

La force nette ($F_{tr} - F_T$) accélère le véhicule, ou le décélère si F_T dépasse F_{tr} .

Si la force F_{cr} , est négative, le véhicule de second pente.

Le travail est défini par l'expression suivante :

$$\vec{w} = \sum_{i=1}^4 \vec{F}_i \cdot d\vec{x} \quad (\text{II.8})$$

Lorsqu'on dérive le travail par rapport au temps, on aura l'expression suivante :

$$p = \frac{d\vec{w}}{dt} = \vec{F} \left(\frac{d\vec{x}}{dt} \right) \Leftrightarrow p = \vec{F} \cdot \vec{v} \quad (\text{II.9})$$

Où :

p : Puissance mécanique

II.4. Modélisation de la Batterie

Différents auteurs ont proposé des modèles pour la batterie, et les résultats d'expériences sur des batteries au plomb/acide dérivent un modèle appelé « modèle CIEMAT » représentant le fonctionnement du batterie pendant la charge, la décharge et la surcharge processus. Notre étude propose un modèle validé pour la batterie par rapport à la capacité de la batterie pour toute taille et type de batterie plomb-acide [46].

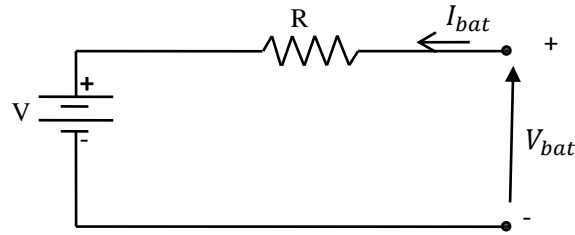


Figure II.3. modélisation de la batterie

A partir du loi de kirchhoff, une équation a été déduite

$$V_{bat} = V - RI_{bat} \quad (\text{II.10})$$

V_{bat} et I_{bat} : dépendent de l'état de charge de la batterie (soc), variations de température et de résistance interne R. cette étude de modèle simple basé sur le « modèle CIEMAT » pour la batterie est considérée comme suffisamment précise pour évaluer objectifs de gestion de l'énergie et de comparer les performance de plusieurs stratégies. Pendant la charge et processus de décharge , l'état de charge (soc) en termes de temps (t) peut être exprimé par[47]

$$SOC(t) = \begin{cases} soc(t - \Delta t) + p_{bat} \cdot \frac{\eta_{ch}}{C_n \cdot V_{dc}} \cdot \Delta t \\ soc(t - \Delta t) + p_{bat} \cdot \frac{1}{\eta_{dis} \cdot C_n \cdot V_{dc}} \cdot \Delta t \end{cases} \quad (\text{II.11})$$

Avec :

Δt est le pas de temps

p_{bat} est représentée la puissance de la batterie

C_n est la capacité nominale de la batterie

η_{ch} et η_{dis} sont respectivement l'efficacité de la batterie pendant la phase de charge et de décharge

V_{dc} désigne la tension nominale du bus DC. A tout pas de temps Δt , le soc doit respecter les contraintes suivantes

$$SOC_{min} \leq SOC(t) \leq SOC_{max} \quad (\text{II.12})$$

Où :

SOC_{min} et SOC_{max} sont les stockages minimum et maximum des capacités autorisés

II.5. Modélisation de Pile à Combustible

Un modèle dynamique de la pile à combustible (FC) est basé sur la relation entre la tension de sortie et la pression potentielle d'hydrogène, d'oxygène et d'eau. La tension de sortie globale de la pile à combustible peut être obtenue comme suit : [48,49]

Avec :

$$V_{PAC} = E_{nerst} - V_{act} - V_{ohm} - V_{conc}$$

(II.13)

E_{nerst} La tension de Nerst, qui est la thermodynamique tension des cellules et dépend des températures et pressions partielles des réactifs et des produits à l'intérieur de l'empilement

$$\begin{cases} E_{nerst} = N_0 \left[E_0 + \frac{RT}{2F} \log \left(\frac{P_{H_2} P_{O_2}^{0.5}}{P_{H_2O}} \right) \right] \\ V_{ohm} = R_m I \end{cases}$$

(II.14) E_0 Est le potentiel de cellule réversible standard(V)

N_0 Est le nombre de cellules dans la pile

R Est la constante universelle des gaz (8.3145J.mol⁻¹)

T_s Est la température de la cheminée(K)

F Est la constante de Faraday(96485A.C.mol⁻¹)

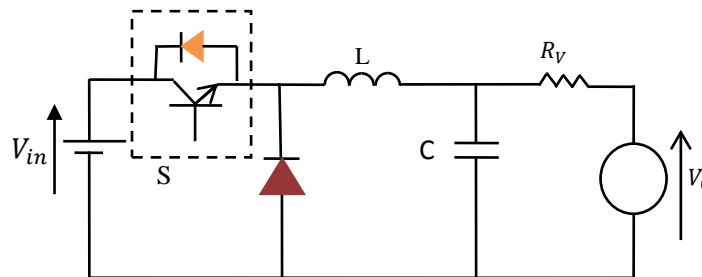
Où :

$P_{H_2}, P_{O_2}, P_{H_2O}$: sont les partielles d'hydrogène, d'oxygène et l'eau (atm) respectivement

II.6. Modélisation des Convertisseurs Statiques

II.6.1. Modélisation de Convertisseur Buck

Un convertisseur buck est un hacheur série ou un convertisseur direct DC-DC qui donne en sortie une tension plus petite que celle de l'entrée [50].



FigureII.4. Schéma de montage de convertisseur Buck.

- lorsque S est passant et D bloqué

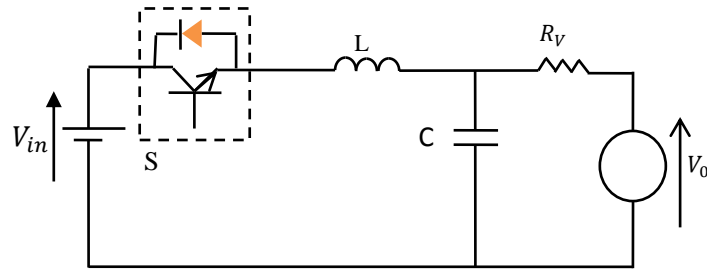


Figure II.5. Schéma de montage de convertisseur lorsque interrupteur passant

$$\begin{cases} V_{in} = L \frac{dI_L}{dt} + V_C \\ \frac{dI_L}{dt} = \frac{1}{L}V_{in} - \frac{1}{L}V_C \\ I_L = C \frac{dV_C}{dt} + \frac{1}{R}(V_C - V_0) \\ \frac{dV_C}{dt} = \frac{1}{C}I_L - \frac{1}{RC}(V_C - V_0) \end{cases} \quad (II.15)$$

- Alors le modèle d'état est comme suit :

$$X = A_1 X + B_1 U \quad (II.16)$$

Avec :

$$\begin{cases} U = \begin{bmatrix} V_{in} \\ V_0 \end{bmatrix} \\ X = \begin{bmatrix} I_L \\ V_C \end{bmatrix} \end{cases} \quad (II.17)$$

Alors :

$$\begin{bmatrix} \frac{dI_L}{dt} \\ \frac{dV_C}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{-1}{L} \\ \frac{1}{C} & \frac{-1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_L \\ V_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & \frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{in} \\ V_0 \end{bmatrix} \quad (II.18)$$

- Lorsque **S** bloqué et **D** passante

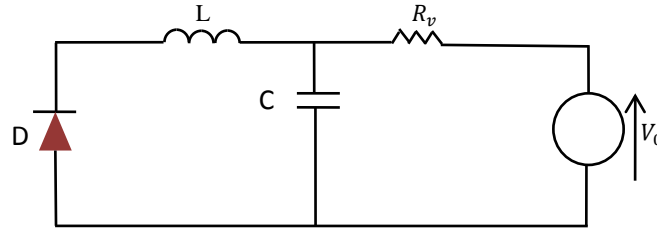


Figure II.6. Schéma de montage de convertisseur lorsque interrupteur est bloqué.

$$\begin{cases} 0 = L \frac{dI_L}{dt} + V_C \\ \frac{dI_L}{dt} = -\frac{1}{L} V_C \\ C \frac{dV_C}{dt} = I_L - \frac{1}{R} (V_C - V_0) \\ \frac{dV_C}{dt} = \frac{1}{C} I_L - \frac{1}{RC} (V_C - V_0) \end{cases} \quad (\text{II.19})$$

Alors on obtient le modèle d'état :

$$\begin{bmatrix} \frac{dI_L}{dt} \\ \frac{dV_C}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_L \\ V_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{in} \\ V_0 \end{bmatrix} \quad (\text{II.20})$$

Modèle d'état moyen

$$A = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \quad \text{Et} \quad B = \begin{bmatrix} \frac{d}{L} & 0 \\ 0 & \frac{1}{RC} \end{bmatrix} \quad (\text{II.21})$$

Alors :

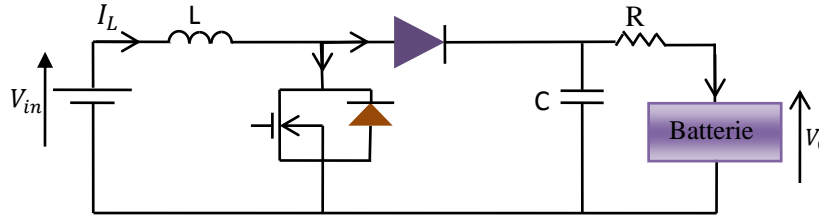
$$\begin{cases} L \frac{dI_L}{dt} = -V_C + dV_{in} \\ C \frac{dV_C}{dt} = I_L + \frac{1}{R} (V_0 - V_C) \end{cases} \quad (\text{II.22})$$

La loi de commande :

$$d = \frac{U + V_C}{V_{in}} \quad (\text{II.23})$$

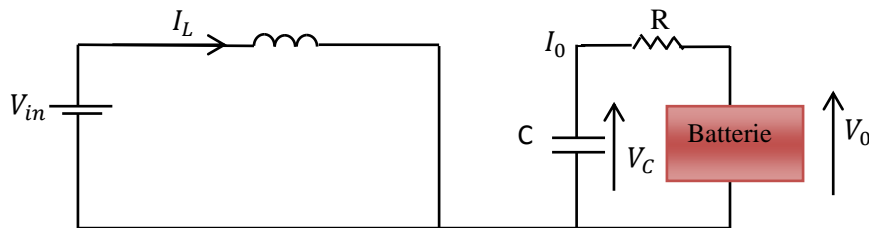
II.6.2. Modélisation de Convertisseur Elévateur (boost)

C'est un hacheur parallèle qui donne en sortie une tension plus grande que celle de l'entrée [51].



FigureII.7. Schéma de convertisseur Boost

- **Première cas : S est passant D bloqué**



FigureII.8. : Circuit Boost lors de la fermeture du MOSFET.

$$\begin{cases} V_{in} = L \frac{dI_L}{dt} \\ \frac{dI_L}{dt} = \frac{1}{L} V_{in} \\ \frac{1}{R} (V_c - V_0) - C \frac{dV}{dt} = 0 \\ \frac{dV_c}{dt} = \frac{1}{RC} (V_c - V_0) \end{cases} \quad (II.24)$$

Modèle d'Etat :

$$X = A_1 X + B_1 U \quad (II.25)$$

Avec :

$$\begin{cases} U = \begin{bmatrix} V_{in} \\ V_0 \end{bmatrix} \\ X = \begin{bmatrix} I_L \\ V_c \end{bmatrix} \end{cases} \quad (II.26)$$

Alors :

$$\begin{bmatrix} \frac{dI_L}{dt} \\ \frac{dV_C}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_L \\ V_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{in} \\ V_0 \end{bmatrix} \quad (II.27)$$

- Deuxième cas : S est bloqué D passant

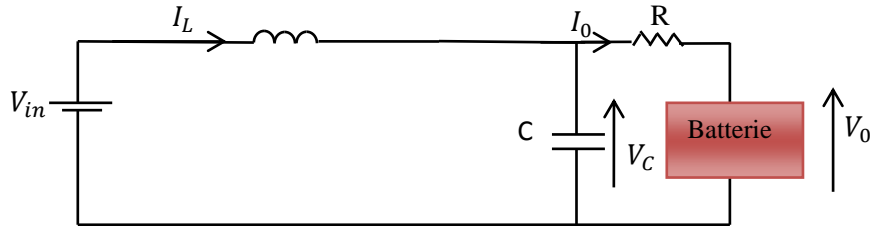


Figure II.9. Circuit Boost lors de l'ouverture du MOSFET.

$$\begin{cases} V_{in} = L \frac{dI_L}{dt} + V_C \\ \frac{dI_L}{dt} = -\frac{1}{L}V_C + \frac{1}{L}V_{in} \\ I_L = C \frac{dV_C}{dt} + \frac{1}{R}(V_C - V_0) \\ \frac{dV_C}{dt} = \frac{1}{C}I_L + \frac{1}{RC}(-V_C + V_0) \end{cases} \quad (II.28)$$

Modèle d'état :

$$X = A_2 X + B_2 U \quad (II.29)$$

Alors :

$$\begin{bmatrix} \frac{dI_L}{dt} \\ \frac{dV_C}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & \frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_L \\ V_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & \frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{in} \\ V_0 \end{bmatrix} \quad (II.30)$$

Le modèle d'état moyen :

$$\begin{cases} X = AX + BU \\ A = A_1 \cdot d + A_2(1-d) \\ B = B_1 \cdot d + B_2(1-d) \end{cases} \quad (II.31)$$

Alors on obtient A et B comme suit :

$$A = \begin{bmatrix} 0 & \frac{-(1-d)}{L} \\ \frac{1-d}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \quad \text{Et} \quad B = \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & \frac{1}{RC} \end{bmatrix} \quad (\text{II.32})$$

Ce qui conduit à :

$$\begin{cases} L \frac{dI_L}{dt} = -(1-d)V_C + V_{in} \\ \frac{dV_C}{dt} = \frac{1-d}{L} I_L - \frac{1}{RC} V_C + \frac{1}{RC} V_0 \end{cases} \quad (\text{II.33})$$

Avec la loi de commande est donner par :

$$\begin{cases} L \frac{dI_L}{dt} = U \\ d = 1 + \frac{U - V_{in}}{V_C} \end{cases} \quad (\text{II.34})$$

II.6.3. Modélisation du Convertisseur dévolteur-survolteur (Buck_ booste)

Le hacheur inverseur (**Buck_Booste**) est un convertisseur indirect **DC-DC** qui peut donner à sa sortie une tension **supérieur** ou **inférieur** à celle de l'entrée suivant la valeur du rapport cyclique qui précise si le montage Boost ou Buck, il se compose d'un transistor **MOSFET** de puissance utilisé comme commutateur contrôlable, inductance **L**, diode, condensateur de filtre **C**, et résistance de charge **R**. Le commutateur est tourné **on-off** à la fréquence de commutation $F_s = 1/T$ avec le rapport cyclique $\alpha = t_{on} / T$, où L'interrupteur est fermé pendant la fraction αT de la période de découpage **T**

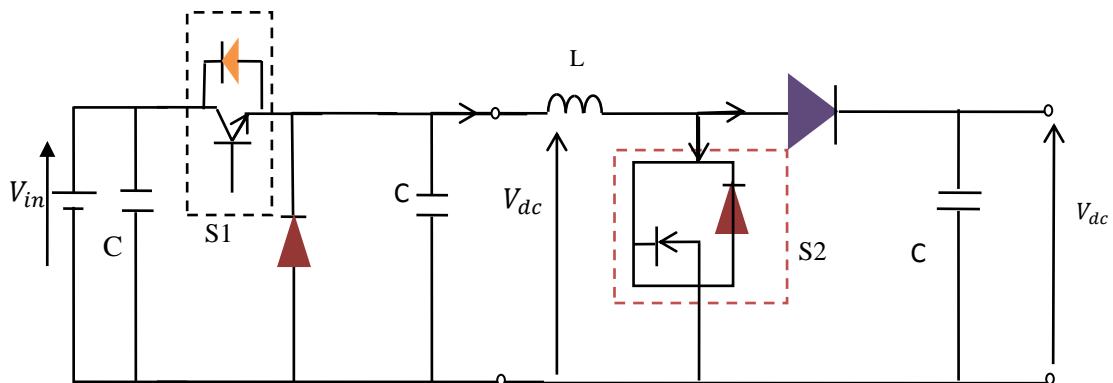


Figure II.10. schéma de convertisseur Buck-Boost.

$$V_{dc} = V_{bat} \frac{\alpha}{(1-\alpha)} \quad \text{Alors} \quad \begin{cases} \alpha = 0 \rightarrow V_0 = 0 \\ \alpha < 0.5 \rightarrow V_0 < V_{in} \\ \alpha = 0.5 \rightarrow V_0 = V_{in} \\ \alpha > 0.5 \rightarrow V_0 > V_{in} \\ \alpha = 1 \rightarrow \infty \end{cases} \quad (\text{II.35})$$

- Si la tension de la sortie est inférieure à la tension de l'entrée \Rightarrow le convertisseur Buck.
- si la tension de la sortie est supérieure à la tension de l'entrée \Rightarrow le convertisseur Boost.

II.7. Modélisation de l'Onduleur de Tension à deux Niveaux

L'onduleur est un convertisseur statique assurant la conversion continu-alternatif, il permet d'imposer aux bornes de la machine des tensions d'amplitude et de fréquence réglable par la commande [52] [53] [54]. On distingue plusieurs types d'onduleurs :

- Selon la source :
 - Onduleurs de tension.
 - Onduleurs de courant.
- Selon le nombre de phases (monophasé, triphasé).
- Selon le nombre de niveaux (2,3, etc.).

La figure (II.11) présente un schéma d'alimentation du moteur synchrone à aimant permanent MSAP par un onduleur de tension à deux niveaux.

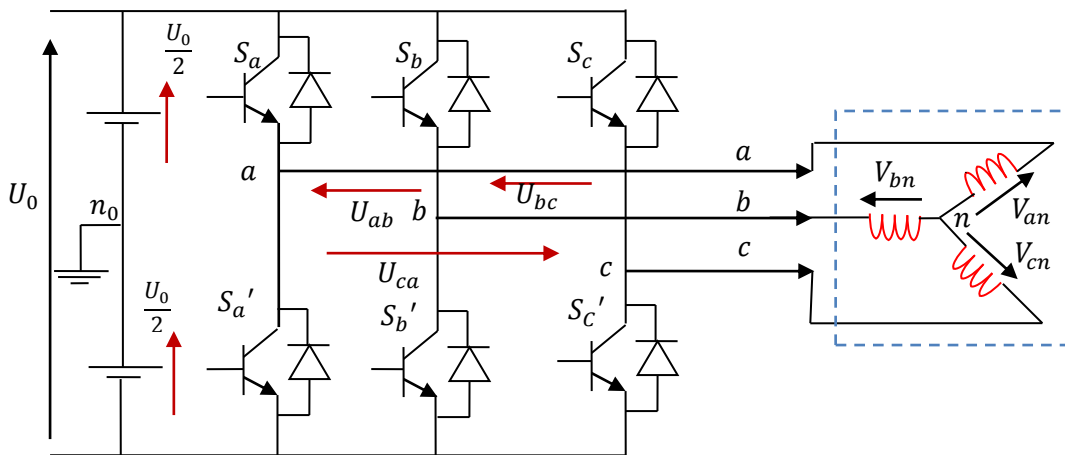


Figure II.11. Schéma de l'Onduleur de Tension à deux niveaux

Pour obtenir une tension alternative, la tension continue d'entrée doit être découpé et appliquer à la charge tantôt dans un sens, tantôt dans l'autre sens. L'onduleur alimenté par une source de tension parfaite impose à sa sortie grâce à l'ouverture et à la fermeture des interrupteurs,

une tension alternative formée d'une succession de créneaux rectangulaires à deux niveaux. La fréquence de fonctionnement est fixée par la commande des interrupteurs [55].

Afin d'éviter le court-circuit de la source de tension continue, les commandes des interrupteurs d'un même bras sont complémentaires

On considère un convertisseur idéal, d'où les hypothèses suivantes :

- la commutation des composants est instantanée.
- les chutes de tension à leurs bornes sont négligeables.
- la charge est triphasée équilibrée et couplée en étoile avec point neutre isolé.

Les tensions simples en fonction des tensions mesurées entre les points a, b, c et le point milieu fictif n_0 sont alors donnée par :

$$\begin{cases} V_{an} = \frac{1}{3}(2V_{an0} - V_{bn0} - V_{cn0}) \\ V_{bn} = \frac{1}{3}(2V_{bn0} - V_{an0} - V_{cn0}) \\ V_{cn} = \frac{1}{3}(2V_{cn0} - V_{an0} - V_{bn0}) \end{cases} \quad (\text{II.36})$$

On obtient enfin sous forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{an0} \\ V_{bn0} \\ V_{cn0} \end{bmatrix} \quad (\text{II.37})$$

Pour un onduleur triphasé, les commandes des interrupteurs d'un bras sont complémentaires. Pour chaque bras il y a donc deux états indépendants. Ces deux états peuvent être considérés comme une grandeur booléenne telle que :

- $S_a, b, c = 1$: Interrupteurs du demi-bras haut sont fermés et interrupteurs du demi-bras bas sont ouvert.

- $S_a, b, c = 0$: Interrupteurs du demi-bras haut sont ouvert et interrupteurs du demi-bras bas sont fermé. Ce qui nous permet d'écrire

$$\begin{bmatrix} V_{an0} \\ V_{bn0} \\ V_{cn0} \end{bmatrix} = U_0 \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.38})$$

Enfin le convertisseur est modélisé par la matrice de connexion suivante :

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} U_0 \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \tag{II.39}$$

II.7.1. Commande par Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI)

La M.L.I est réalisée par comparaison d'une onde modulante basse fréquence (tension de référence) à une onde porteuse haute fréquence de forme triangulaire.

Les instants de commutation des interrupteurs sont déterminés par les points d'intersection entre la porteuse et la modulante [56]. Le schéma de principe de cette technique est donné par la figure (II.20).

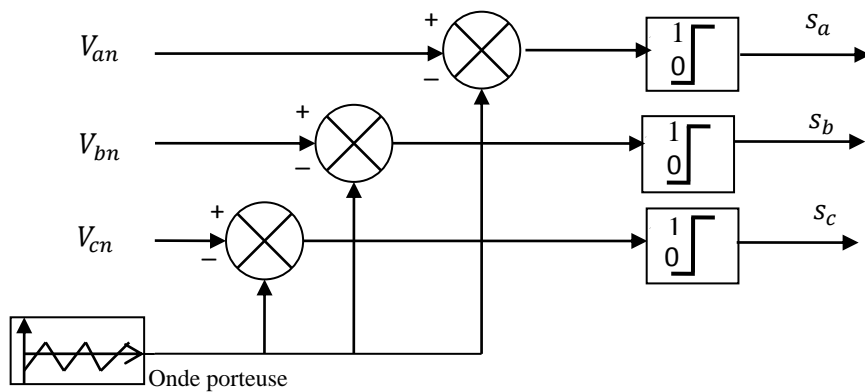


Figure II.12. Schéma de principe de MLI.

La Figure II.12 montre les instants de commutation des interrupteurs

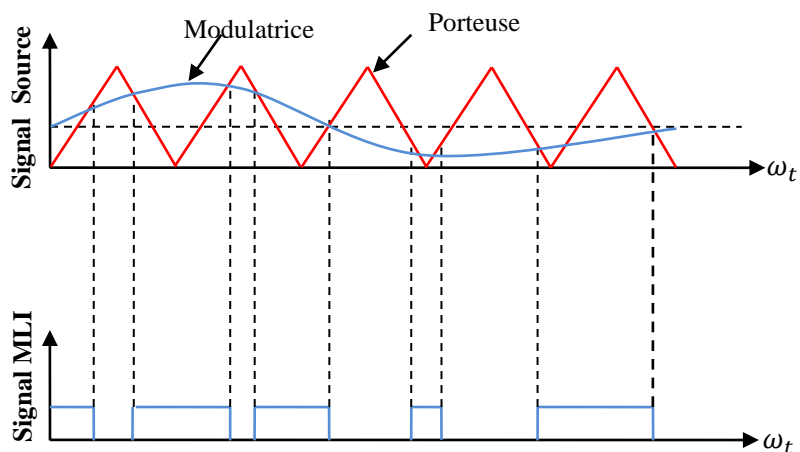


Figure II.13. Principe de la commande MLI.

Cette technique est caractérisée par les deux paramètres suivants :

$$m = \frac{f_p}{f_r} \quad (\text{II.40})$$

Avec :

m : L'indice de modulation qui définit le rapport entre la fréquence f_p de la porteuse et la fréquence f_r de la référence.

$$r = \frac{V_r}{V_p} \quad (\text{II.41})$$

Où :

r : Le taux de modulation (ou coefficient de réglage) qui donne le rapport de l'amplitude de la modulante V_r à la valeur crête V_p de la porteuse.

II.8. Modélisation du Moteur Electrique

II.8.1. Principe de Fonctionnement d'une MSAP

Le stator est alimenté par une tension triphasée équilibrée créant dans l'entrefer un champ tournant, ce dernier a tendance à attirer le rotor, qui est constitué d'aimants permanent produisant un champ tournant d'induction. Les champs d'induction créés par le rotor et le stator ont tendance à s'aligner et un couple d'origine électromagnétique se crée.

Le rotor se met à tourner à une vitesse angulaire (Ω), cette dernière est liée au nombre de paires de pôles (p) et à la pulsation (ω) qui est égale à celle du champ tournant, ce qui justifie la nomination de machine synchrone.

II.8.2. Modélisation de la Machine Synchrone à Aimants Permanents (MSAP)

Pour l'application de la commande de la MASP, la modélisation de la machine synchrone à aimants permanents repose sur les paramètres électrique et mécanique (le moment d'inertie, le frottement visqueux, résistances et inductances, flux d'excitation des aimants...), qui décrivent les phénomènes électromagnétiques et électromécaniques, et sur les hypothèses simplificatrices suivantes [57.58] :

- L'effet d'hystérésis, l'effet de peau ainsi que l'effet de la température et les pertes dans l'acier sont négligeables.
- La machine fonctionne dans un régime non saturé.
- Les résistances de fuites sont indépendantes de la position du rotor [59]
- La distribution de la force magnétomotrice est sinusoïdale ce qui nous permet de considérer seulement le premier harmonique d'espace de la distribution de la F.M.M créée par chaque phase de l'induit [60].

II.8.3. Les équations de MSAP dans le référentiel (a, b, c)

La représentation symbolique du (MSAP) est donnée sur la figure (II.14)

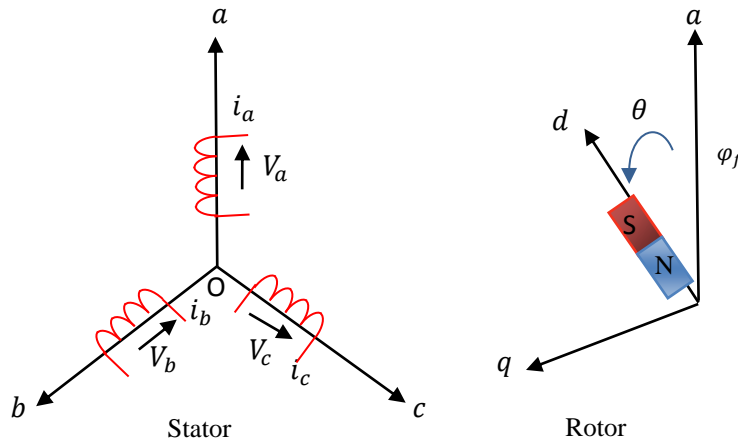


Figure II.14. Schéma de la MSAP [56]

Pour établir des relations simples entre les tensions d'alimentation du moteur et les courants, nous considérons le modèle de MSAP qui comprend trois types d'équations :

II.8.3.1. Équations électriques :

Les équations triphasées des tensions :

$$[V_s] = [R_s] \cdot [i_s] + \frac{d[\phi_s]}{dt} \tag{II.42}$$

Où:

$$[V_s] = [V_{sa} \quad V_{sb} \quad V_{sc}]^T \text{ Vecteur tension statorique.}$$

$$[i_s] = [i_{sa} \quad i_{sb} \quad i_{sc}]^T \text{ Vecteur courant statorique.}$$

$$[\phi_s] = [\phi_{sa} \quad \phi_{sb} \quad \phi_{sc}]^T \text{ Vecteur flux statorique.}$$

$$[R_s] = \begin{bmatrix} R_S & 0 & 0 \\ 0 & R_S & 0 \\ 0 & 0 & R_S \end{bmatrix} \text{ Matrice résistance statorique.}$$

Pour l'ensemble des phases statoriques, on déduit les équations suivantes :

$$\begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_S & 0 & 0 \\ 0 & R_S & 0 \\ 0 & 0 & R_S \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_{sa} \\ \phi_{sb} \\ \phi_{sc} \end{bmatrix} \tag{II.43}$$

Les équations triphasées des flux statoriques :

$$[\phi_s] = [L_s] \cdot [i_s] + [\phi_{sf}] \quad (\text{II.44})$$

Où :

$$[L_s] = \begin{bmatrix} L_a & M_{ab} & M_{ac} \\ M_{ab} & L_b & M_{bc} \\ M_{ac} & M_{bc} & L_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.45})$$

Avec :

$[L_s]$: Matrice inductance de stator.

L_a, L_b, L_c : Les inductances propres des trois phases a, b et c.

M_{ab}, M_{bc}, M_{ac} : Les inductances mutuelles entre phases.

$[\phi_f]$: Vecteur flux engendré par l'aimant définie par

$$[\phi_{sf}] = \begin{bmatrix} \phi_{af} \\ \phi_{bf} \\ \phi_{cf} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \phi_f \cos p\theta \\ \phi_f \cos(p\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \phi_f \cos(p\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (\text{II.46})$$

ϕ_f : La valeur crête constante du flux crée par l'aimant lisse à travers les enroulements statoriques.

θ : Angle de charge désignant la position du rotor par rapport au stator définit par :

$$\theta(t) = \int_0^t \omega_r dt \quad (\text{II.47})$$

Sachant que :

$$\omega_r = \frac{\omega}{p} \quad (\text{II.48})$$

Avec :

ω_r : vitesse de rotation du rotor (rad/s).

ω : Pulsation des courants alternatifs (rad/s).

p : Nombre de paires de pôles.

II.8.3.2. Équations mécaniques

L'application de la 2^{ème} loi de Newton donne l'équation fondamentale de la mécanique décrivant la dynamique du rotor de la machine :

$$J_m \dot{\omega}_r + f_m \omega_r = C_{em} - C_r \quad (\text{II.49})$$

Avec :

J_m : Moment d'inertie

f_m : Coefficient de frottement.

C_{em} : Couple électromagnétique.

C_r : Couple résistant

II.8.4. Transformation de Park

La transformation de Park (Figure II.23) est un outil mathématique consiste à transformé le système triphasé (a, b, c) en un système diphasé (d, q). Ce passage mathématique, transforme les trois bobines statoriques fixes déphasées de $2\pi/3$ en deux bobines fictives équivalentes déphasées de $\pi/2$ et situées sur l'aimant de rotor, se situe sur l'axe d [52] [54].

Cette transformation rend les équations dynamiques des moteurs à courant alternatif plus simples ce qui facilite leurs études et leurs analyses.

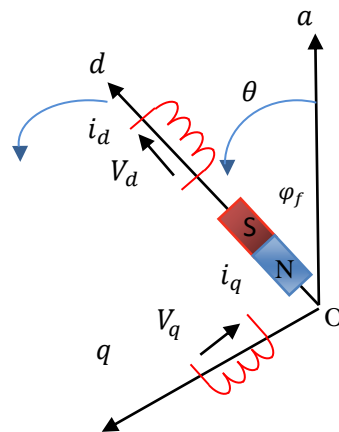


Figure II15. Représentation de la Transformation de Park [56]

Le passage du système triphasé réel au système (d, q) lié au rotor se fait en utilisant les relations suivantes [61] :

$$\begin{cases} [V_{dpo}] = p(\theta) \cdot [V_{Sabc}] \\ [i_{dpo}] = p(\theta) \cdot [i_{Sabc}] \\ [\phi_{dpo}] = p(\theta) \cdot [\phi_{Sabc}] \end{cases} \tag{II.50}$$

$P(\theta)$: La matrice de transformation définit par :

$$P(\theta) = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (\text{II.51})$$

La transformée de Park inverse est nécessaire pour revenir aux grandeurs triphasées, elle est définie par [61] :

$$p(\theta)^T = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 1 \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{II.52})$$

II.8.5. Equations d'Etat de la MSAP

On peut déduire la forme finale du modèle de la MSAP dans le référentiel d-q en fonctionnement normal, c'est-à-dire l'unique perturbation inconnue c'est le couple de charge appliqué à la machine et on considère les tensions (V_d, V_q) et le flux d'excitation (ϕ_m) comme grandeurs de commande, les courants statoriques (I_d, I_q) comme variables d'état [62].

On écrit l'équation

$$\begin{cases} V_d = R_s I_d + \frac{d\phi_d}{dt} - \omega r \phi_q \\ V_q = R_s I_q + \frac{d\phi_q}{dt} + \omega r \phi_d \end{cases} \quad (\text{II.53})$$

Sous la forme suivant:

$$\frac{d}{dt}[X] = [A][X] + [B][U] \quad (\text{II.54})$$

Avec :

X : Vecteur d'état.

U : Vecteur de commande.

A : Matrice fondamentale qui caractérise le système.

B : Matrice d'application de la commande.

$$\begin{cases} V_d = R_s I_d + \frac{dI_d}{dt} - L_q \omega I_q \\ V_q = R_s I_q + \frac{dI_q}{dt} - L_d \omega I_d + \omega \phi_f \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \frac{dI_d}{dt} = \frac{-R_s}{L_d} I_d + \frac{L_q}{L_d} \omega I_q + \frac{1}{L_d} V_d \\ \frac{dI_q}{dt} = \frac{-R_s}{L_q} I_q + \frac{L_d}{L_q} \omega I_d + \frac{1}{L_q} V_q - \frac{1}{L_q} \omega \phi_f \end{cases} \quad (\text{II.55})$$

Sous forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} \frac{dI_d}{dt} \\ \frac{dI_q}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-R_s}{Ld} & \frac{Lq}{Ld} \omega \\ -\frac{Ld}{Lq} \omega & \frac{-R_s}{Ld} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{Ld} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{Lq} & -\frac{1}{Lq} \omega \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ \phi_f \end{bmatrix} \quad (\text{II.56})$$

On suppose :

$$X = \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} ; \quad U = \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ \phi_f \end{bmatrix} ; \quad Y = \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix}$$

$$A = \begin{bmatrix} \frac{-R_s}{Ld} & \frac{Lq}{Ld} \omega \\ -\frac{Ld}{Lq} \omega & \frac{-R_s}{Ld} \end{bmatrix} ; \quad B = \begin{bmatrix} \frac{1}{Ld} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{Lq} & \frac{1}{Lq} \end{bmatrix} ; \quad C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

L'équation mécanique est donné par :

$$f \Omega + J \frac{d\Omega}{dt} = C_{em} - C_r$$

$$C_e = \frac{3}{2} p [(L_d - L_q) I_d I_q + \phi_f I_q] \quad (\text{II.57})$$

$$\Omega = \frac{\omega}{p}$$

II.8.6. Equations de la machine dans les axes d-q

Equations électrique :

$$\begin{cases} V_d = R_s \cdot I_d - \omega_r \cdot \phi_q + \frac{d}{dt}(\phi_d) \\ V_q = R_s \cdot I_q + \omega_r \cdot \phi_d + \frac{d}{dt}(\phi_q) \end{cases} \quad (\text{II.58})$$

Equations magnétiques :

$$\begin{cases} (\phi_d) = L_d \cdot I_q + \phi_f \\ (\phi_q) = L_q \cdot I_d \end{cases} \quad (\text{II.59})$$

En remplaçons ϕ_d et ϕ_q par leur expression (2.31) dans (2.30) on aura :

$$\begin{cases} V_d = R_s \cdot I_d - \omega_r \cdot L_q \cdot L_q + L_d \cdot \frac{d}{dt}(I_d) \\ V_q = R_s \cdot I_q + \omega_r \cdot L_d \cdot I_d + L_q \cdot \frac{d}{dt}(I_q) + \omega_r \cdot \phi_f \end{cases} \quad (\text{II.60})$$

En appliquant la transformation de LAPLACE à l'équation précédente on trouve :

$$\begin{cases} V_d(S) = (R_s + SL_d) \cdot I_d(S) - \omega_r(S) \cdot L_q \cdot I_q(S) \\ V_q(S) = (R_s + SL_q) \cdot I_q(S) - \omega_r(S) \cdot L_d \cdot I_d(S) + \omega_r(S) \cdot \phi_f \end{cases} \quad (\text{II.61})$$

Avec S : Operateur de LAPLACE

Sous forme matricielle on peut écrire

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (R_s + SL_d) - \omega_r \cdot L_q \\ \omega_r \cdot L_d (R_s + SL_q) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_r \cdot \phi_f \end{bmatrix} \quad (\text{II.62})$$

Expression du couple électromagnétique :

Le couple électromagnétique dans le référentielle de PARK s'écrit :

$$C_{em} = \frac{3}{2} \cdot p \cdot (\phi_d \cdot I_q - \phi_q \cdot I_d) \quad (\text{II.63})$$

En remplaçant l'équation (2.59) dans (2.63) l'expression du couple électromagnétique Devient :

$$C_{em} = \frac{3}{2} \cdot p \cdot [(L_d - L_q) \cdot L_d \cdot I_q + \phi_q \cdot I_q] \quad (\text{II.64})$$

On note :

$\phi_q \cdot I_q$: Le couple électromagnétique d'une machine à pole lisse.

$(L_d - L_q) \cdot I_d \cdot I_q$: Couple supplémentaire du a la saillance du rotor

Equation mécanique :

$$J \cdot \frac{d\Omega}{dx} = C_{em} - C_r - f_r \cdot \Omega \quad (\text{II.65})$$

II.8. Conclusion

L'objectif principal de ce chapitre était d'étudier la modélisation dynamique linéaire d'une voiture électrique, ainsi que la liaison entre les parties mécanique et électrique.

Après avoir obtenu le modèle global de la voiture, nous avons présenté le comportement dynamique de la conduite électrique en fonction des forces affectant la voiture. La conception de la voiture est basée sur les caractéristiques du moteur qui sont déterminées par les forces de tension et l'accélération de la voiture, puis nous devons modéliser la chaîne de traction en commençant par les sources d'énergie (pile à combustibles et batterie) et les convertisseurs. Ensuite nous passons au moteur synchrone à aimant permanent MSAP

L'objet de prochain chapitre basé sur la Commande du MSAP par régulateur PI et la gestion de l'énergie dans les véhicules électriques par la technique de réseaux de neurone.

Chapitre III
Commande et Gestion
d'Énergie des Véhicules
Électriques

III.1. Introduction

La gestion d'énergie permet de déterminer le réglage du puissance fournie par les différentes sources à partir de la puissance demandée par la charge. Dans cette étude, nous souhaitons de satisfaire la demande du véhicule par l'utilisation d'un ensemble d'algorithmes permettant de commander le système de gestion d'énergie [63 ,64]. La structure du véhicule sur laquelle sera implémentée notre architecture de contrôle est un véhicule routier à quatre roues, alimentées par une source hybride constituée d'un pack de batteries et d'une pile à combustible.

Le système a été simulé sous l'environnement **Matlab/Simulink**, et les approches de commande ont été testées sous un cycle de conduite normalisé. Nous allons commencer, d'abord, par la présentation des différentes stratégies de commande puis la description de la gestion énergétique, Ensuite, nous exposons les résultats de simulation du groupe motopropulseur et du gestionnaire d'énergies des deux sources.

III.2. Différentes Techniques du Commandes d'VEs

Les simulations numériques ont été effectuées sur un véhicule électrique propulsé par un moteur synchrone à aimant permanent de 57,7 kW alimenté par un onduleur de tension à deux niveaux. La Commandes appliquée sur la chaîne de traction est la commande vectorielle et la technique de gestion d'énergie utilisée dans notre étude est la méthode Réseaux des neurones artificiels

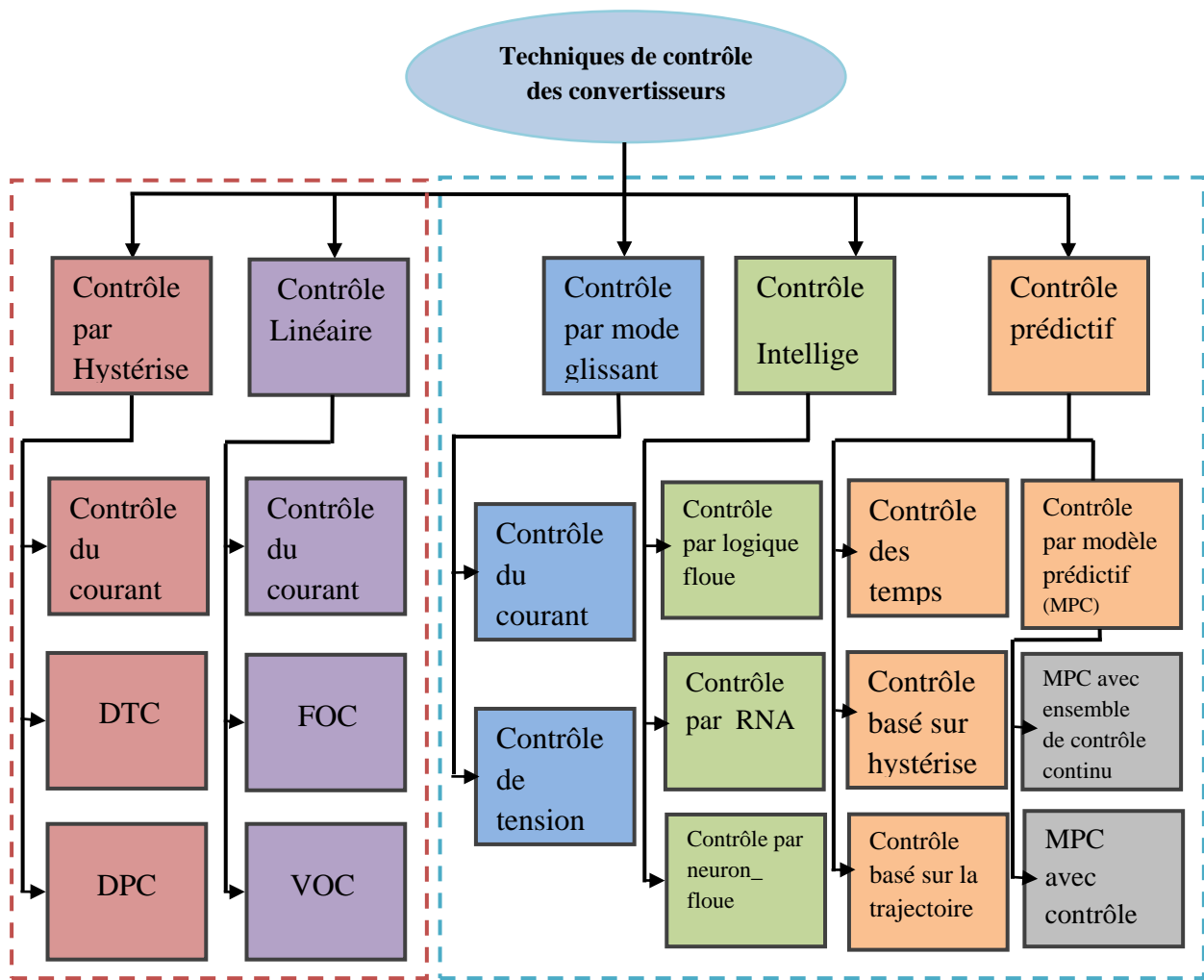
La (**figure III.1**) illustre et résume les techniques de contrôle appliqué au véhicule électrique

III.3. Commande de Machine MSAP

III.3.1. Principe de la Commande Vectorielle

Le principe de la commande vectorielle consiste à régler le flux par une composante du courant et le couple par l'autre composante. Il faut donc, choisir un système d'axe (d, q) et une loi de commande qui assure le découplage du flux et du couple [65]. Il existe deux approches pour la détermination de la phase du flux rotorique [66] :

- **Une commande indirecte** : la phase du flux rotorique est estimée à partir d'une relation donnant la vitesse du glissement.
- **Une commande directe** : la phase du flux rotorique est mesurée par un capteur physique, Ou estimée en utilisant un modèle dynamique.



FOC: flux based oriented control

DPC: Direct power control

VOC: voltage oriented control

Figure III.1. Différentes techniques de contrôle

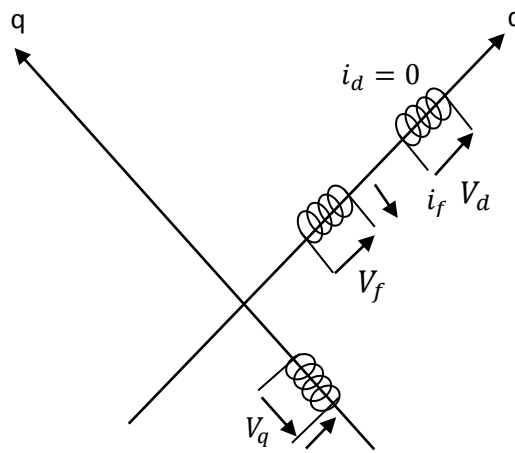


Figure III.2 Commande par Orientation du Champ de la MSAP

L'équation de couple (C_{em}) montre que celui-ci dépend de deux variables i_q et i_d . Parmi les stratégies de commande, on utilise souvent celle qui consiste à maintenir la composante id nulle. Cette stratégie permet de l'obtention d'une loi de commande simplifiée avec une relation linéaire entre le couple et le courant [67].

L'expression du couple devient :

$$i_d = 0 \quad \Rightarrow \quad C_{em} = \frac{3}{2} P \phi_f i_q \quad (\text{III.1})$$

Comme le flux ϕ_f est constant, le couple est directement proportionnel à i_q .

Donc :

$$C_{em} = K i_q \quad (\text{III.2})$$

Avec :

$$K = \frac{3}{2} p \phi_f \quad (\text{III.3})$$

La mise en œuvre de la commande vectorielle va être effectuée en réalisant une boucle de réglage de courant i_d , maintenu à une valeur de référence nulle. Ce qui nécessite un découplage dans le cas d'une commande linéaire.

Le modèle de MSAP dans le système de référence Park résulte en un système d'équations différentiel où les courants ne sont pas indépendants les uns des autres. Ils sont reliés par des termes non linéaires ($p w_r L_q i_q$) et ($p w_r L_d i_d$) :

$$\begin{cases} V_d = \left[R_S i_d + L_d \frac{d i_d}{dt} \right] - p \omega_r L_q i_q \\ V_q = \left[R_S i_q + L_q \frac{d i_q}{dt} \right] + p \omega_r (L_d i_d + \phi_f) \end{cases} \quad (\text{III.4})$$

Ce couplage est éliminé par une méthode de compensation. Cette méthode consiste à faire ajouter des termes afin de rendre les axes d et q complètement indépendants [67].

III.3.2. Découplage par compensation

Le but de la compensation est de découpler les axes d et q. Ce découplage permet d'écrire les équations de la machine et de la partie régulation d'une manière simple et ainsi de calculer aisément les coefficients des régulateurs. Le principe de ce découplage revient à définir deux nouvelles variables de commande « e_d » et « e_q » telle que :

$$\begin{cases} V_d = V_d^* - e_d \\ V_q = V_q^* + e_q \end{cases} \quad (\text{III.5})$$

Avec :

$$\begin{cases} V_d^* = \left[R_S i_d + L_d \frac{d i_d}{dt} \right] \\ V_q^* = \left[R_S i_q + L_q \frac{d i_q}{dt} \right] \end{cases} \quad (\text{III.6})$$

Et :

$$\begin{cases} e_d = p \omega_r L_q i_q \\ e_q = p \omega_r (L_d i_d + \phi_f) \end{cases} \quad (\text{III.7})$$

On a donc les courants " i_d " et " i_q " sont découplés. Le courant i_d ne dépend que de V_d^* , et i_q ne dépend que V_q^* , à partir de l'équation (III.6) les courant i_d et i_q s'écrivent de la façon suivante :

$$\begin{cases} i_d = \frac{V_d^*}{R_S + sL_d} \\ i_q = \frac{V_q^*}{R_S + sL_q} \end{cases} \quad (\text{III.8})$$

S : Opérateur de la place.

Le principe de régulation consiste à réguler les courants statoriques à partir des grandeurs de référence (désirées) par les régulateurs classiques. Le schéma de principe de régulation des courants statoriques est représenté par la figure ci-dessous :

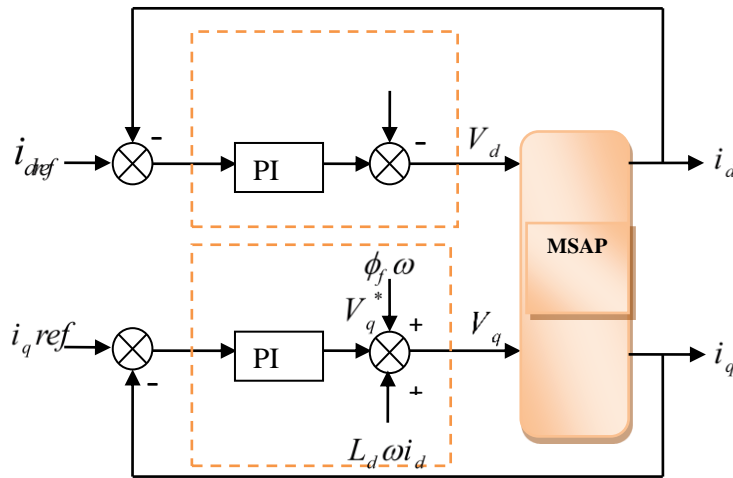


Figure III.3. Principe de Découplage par Compensation

Lorsque le découplage entre l'axe d et l'axe q est réalisé et i_d est maintenu nul, le schéma équivalent de la machine MSAP s'est réduit alors à un schéma équivalent à celui d'un moteur à courant continu à excitation séparé. Comme le moteur MSAP est couplé à la roue via le réducteur, le schéma bloc de l'ensemble (MSAP + réducteur + roue) est illustré sur la figure

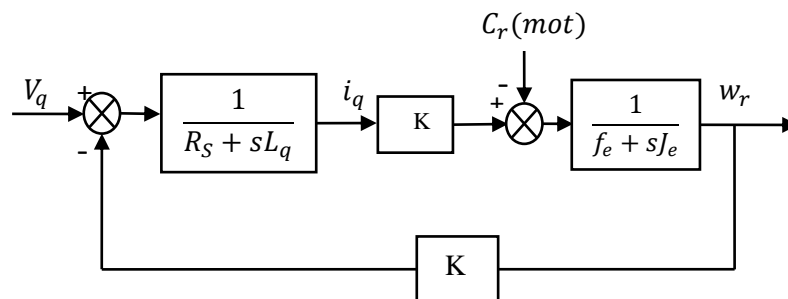


Figure III.4. Schéma Bloc du MSAP après Orientation du Champ Couplé à la roue

III.3.3. Régulateur PI

Le calculateur calcule alors à partir de la consigne de vitesse du moteur, le flux et le couple nécessaire, desquels on déduit les courants requis. Typiquement, un régulateur PI sert à maintenir le courant à la valeur demandée. La modulation de largeur d'impulsion (MLI) gère ensuite la commutation des transistors du variateur de vitesse électrique en fonction de la consigne de tension qui lui parvient. Un régulateur PI est placé après les consignes de courant afin de stabiliser l'ensemble.

Pour calculer les paramètres des régulateurs, on adopte des modèles linéaires continus.

Les méthodes classiques de l'automatique sont utilisables. Ces méthodes ont l'avantage d'être simples et faciles à mettre en œuvre. Le régulateur (PI) est la mise en parallèle des actions proportionnelle et intégrale, comme montre la figure (III.5) :

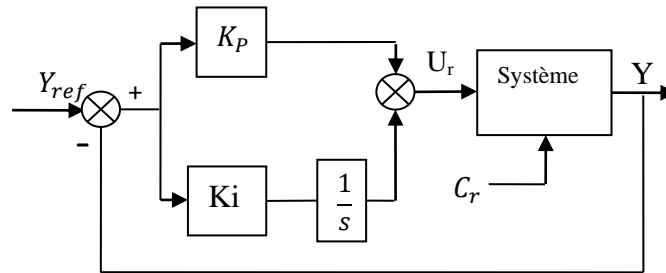


Figure III.5. Régulateur PI

La relation entre la sortie $U_r(t)$ et le signal d'erreur $\varepsilon(t)$ est donné par l'expression suivante :

$$U_r(t) = K_p \cdot \varepsilon(t) + K_i \int_0^t \varepsilon(t) dt \tag{III.9}$$

$$\frac{U_r(s)}{\varepsilon(s)} = K_p + \frac{K_i}{s} \tag{III.10}$$

III.3.3.1. Dimensionnement des régulateurs

Ce type de régulateur est en générale applicable pour les procédés caractérisés par une fonction de transfert en boucle ouvert (1^{er} ordre) de la forme :

$$H_{BO}(s) = \frac{G}{1 + \tau s} \tag{III.11}$$

Les objectifs de cette régulation est d'avoir un système en boucle fermée ayant une erreur statique nulle pour une entrée en échelon et une réponse apériodique sans dépassement avec un temps de montée t_m . La fonction de transfert en boucle fermée qui assure ces performances est donnée par :

$$H_{BF}(S) = \frac{G}{1 + \tau_0 s} \tag{III.12}$$

Avec τ_0 est constante de temps qui caractérise la dynamique voulue ; elle est définit par :

$$\tau_0 = \frac{t_m}{I_n(9)} \approx 0.4551 t_m \tag{III.13}$$

A partir de la fonction de transfert du régulateur et du procédé, nous obtenons la fonction De transfert en boucle fermée :

$$H_{BF}(s) = \frac{\frac{K_p}{T_i s} (1 + T_i s) \frac{G}{1 + \tau s}}{1 + \frac{K_p}{T_i s} (1 + T_i s) \frac{G}{1 + \tau s}} = \frac{1}{1 + \tau_0 s} \tag{III.14}$$

Pour vérifier l'équation précédente, il suffit de compenser la dynamique du système par le zéro introduit par le régulateur. Donc, les paramètres de réglage qui en résultent prennent la forme :

$$K_p = \frac{\alpha}{G} \qquad T_i = \tau \qquad \text{(III.15)}$$

Avec : α caractérise l'accélération de la boucle de courant et correspond au rapport entre la dynamique réelle et la dynamique voulue après la régulation.

Il est défini par l'équation :

$$\alpha = \frac{\tau}{\tau_0} \qquad \text{(III.16)}$$

Donc, pour caractériser un système du premier ordre par une dynamique voulue (un temps de réponse voulu). Il suffit de calculer la constante de temps correspondant τ_0 à partir de l'équation (III.13), puis insérer un régulateur PI et d'ajuster ses paramètres par l'utilisation des équations (III.15) et (III.16).

III.3.3.2. Utilisation d'un régulateur PI pour la boucle de courant

L'utilisation d'un régulateur PI pour la commande du couple est illustrée sur la figure (III.6)

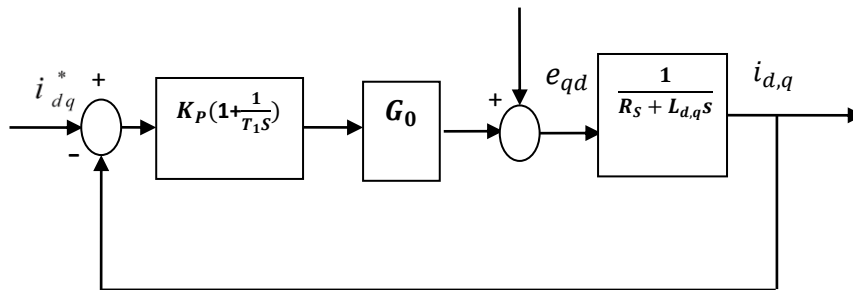


Figure III.6. Régulation de Courant avec Correcteur PI.

Les paramètres de la régulation peuvent être directement obtenus à l'équation (III.15) en remplaçant le gain G par $\frac{G_0}{R_s}$ et la constante de temps par R_s sachant que la dynamique voulue est définie dans l'équation (III.16) Nous obtenons ce qui suit :

$$\tau_0 = \frac{1}{\alpha} \frac{L_{d,q}}{R_s} \qquad \text{(III.17)}$$

Les paramètres de réglage ainsi obtenus à partir de l'équation (III.15) sont donnés par :

$$K_p = \frac{\alpha R_s}{G_0} \quad ; \quad T_i = \frac{L_{d,q}}{R_s}$$

Nous considérons que la machine ne génère pas de composante homopolaire, seule la composante biphasée de la commande du convertisseur est amplifiée par l'onduleur et la composante homopolaire n'est pas transmise. La dynamique de l'onduleur peut être rapprochée par un gain statique G_0 qui vaut :

$$G_0 = \frac{1}{2} \frac{U_0}{\omega_m} \tag{III.18}$$

Pour avoir un gain statique unitaire, il suffit de régler l'amplitude de la porteuse (ω_m) à la Moitié de celle de la tension continue d'alimentation de l'onduleur.

III.3.3.3. Régulateur de vitesse

La boucle de régulation de vitesse contient habituellement deux étages. Le premier comprend les boucles de régulation des courants, et le second, le plus externe est la boucle de régulation de vitesse (variable avec dynamique plus lente). C'est pour cette raison que pour la boucle externe on impose des pôles plus proches de l'origine que ceux pour la boucle interne. L'équation mécanique est donnée par :

$$\frac{\omega_r}{C_{em}} = \frac{p}{F + J_S} \tag{III.19}$$

Le schéma bloc de la vitesse est donc réalisé comme indiqué sur la figure III.7

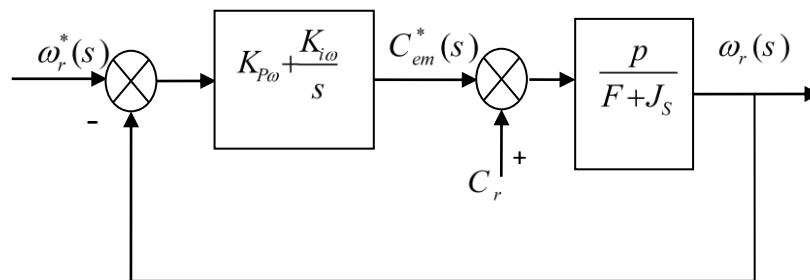


Figure III.7. Schéma fonctionnel de régulation de vitesse.

La fonction de transfert en boucle fermée est donnée par :

$$\frac{\omega_r}{\omega_r^*} = \frac{(K_{i\omega}) \frac{1}{F}}{1 + \frac{K_{i\omega}}{s}} \tag{III.20}$$

On obtient les paramètres du régulateur PI :

$$K_{i\omega} = \frac{1}{\tau} F \tag{III.21}$$

$$K_{p\omega} = \frac{1}{\tau} J \tag{III.22}$$

Avec :

τ : Constante de temps du régulateur de vitesse

On peut choisir $\tau = \frac{J}{F}$

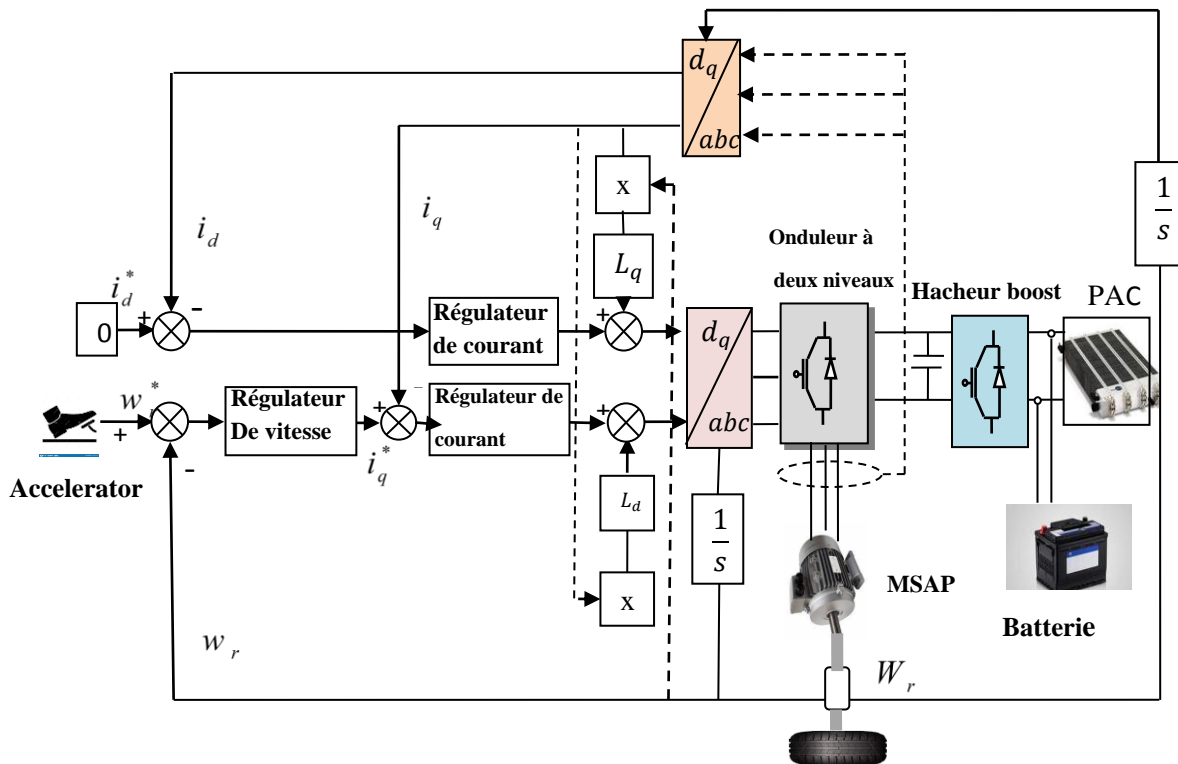


Figure III.8 Commande vectorielle dans le référentiel d, q.

III.4. Gestion d'énergie d'un Véhicule Electrique

Le véhicule électrique hybride dispose de deux sources d'énergie : la pile à combustible agit comme source principale et les batteries (la source secondaire) qui ne peut pas soutenir seule la demande de puissance. Pour un fonctionnement à longue portée, le pack de batteries qui est initialement complètement chargé est incapable de fournir l'énergie totale requise. La pile à combustible complète la puissance fournie par la source primaire. Cependant, le coût de l'hydrogène

est généralement supérieur à celui de l'électricité du réseau et ce rapport de coût doit être pris en compte lors de la conception du système de gestion de l'énergie. Pour permettre aux batteries de ne pas être déchargée en dessous d'un seuil d'énergie minimum donné, le système de gestion d'énergie (SGE) doit déterminer le moment approprié pour démarrer la pile à combustible. En effet, si la pile à combustible est démarrée en retard pendant le voyage, l'énergie de la batterie peut descendre sous ce seuil minimum à la fin du voyage.

D'autre part, comme les batteries sont supposées être initialement complètement chargées, le départ trop tôt de la pile à combustible peut réduire sa capacité à traiter de manière adéquate l'énergie de régénération au cours du voyage. En plus, le SGE doit tenir compte du fait que la masse du véhicule peut varier au cours du voyage.

III.4.1. Présentation de la méthode de gestion

La **figure III.9** présente le système retenu dans cette étude. Ce système comporte deux sources d'énergies : Une source primaire (la pile à combustible) et une deuxième source dite secondaire (la batterie). En résumé, une gestion optimale de l'énergie passe en premier lieu par une meilleure distribution de l'énergie entre les sources du système pendant le fonctionnement du véhicule (moteur et les services auxiliaires du VE à savoir chauffage, climatisation, essuie-glace, radio...etc.) [68] et d'un autre coté la non négligence de l'état de charge de la batterie.

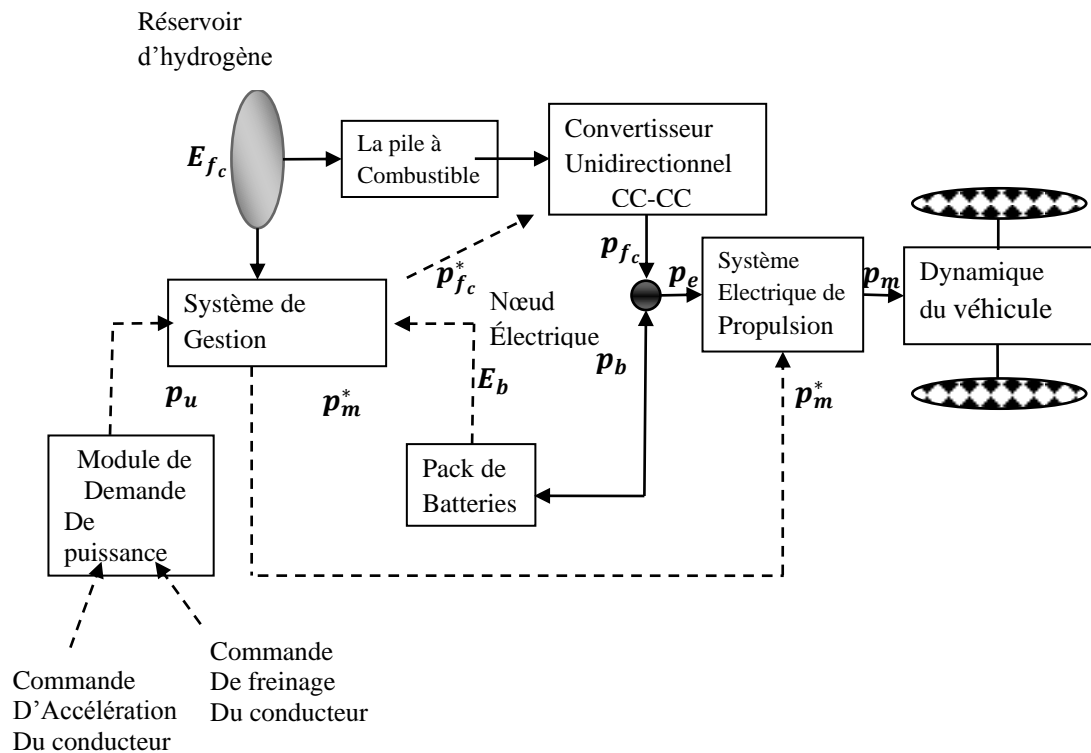


Figure III.9 Présentation de la méthode de gestion

III.4.2. Modes de Fonctionnement

Une gestion efficace de l'énergie vise à faire fonctionner les composants du groupe motopropulseur avec une efficacité élevée tout en maintenant une quantité d'énergie satisfaisante dans les dispositifs de stockage. En outre, la consommation de carburant doit être minimisée sans affecter les performances du véhicule, ce qui ne peut être obtenu que en adaptant une stratégie de contrôle appropriée [69]. La Figure III.10 présente les différents modes de conduite avec le flux d'énergie.

Mode1 : mode de production d'énergie élevée, en cas d'accélération ou de conduite en montée, la demande d'énergie est élevée, la pile à combustible (PC) et la batterie fournissant de l'énergie au moteur.

$$P_{ch} = P_{pac} + P_{bat} \quad (\text{III.23})$$

Mode2 : connu sous le nom de mode moyenne puissance, la pile à combustible (FC) est la seule source d'énergie dans ce mode, il peut également fournir énergie à la batterie si son état de charge (SOC) est inférieur à 30 %.

$$P_{ch} = P_{pac} \quad (\text{III.24})$$

Mode3 : Le mode basse consommation, dans ce cas le véhicule est alimenté par l'énergie générée par la batterie seule, la pile à combustible est arrêtée car son efficacité du système, y compris la consommation d'énergie des pièces auxiliaires, comme le compresseur d'air, diminue la consommation d'énergie.

$$P_{ch} = P_{bat} \quad (\text{III.25})$$

Mode4 : le mode de freinage régénératif, la pile à combustible ne génère aucune puissance ; par contre la batterie absorbe l'énergie fournie par le moteur, qui agit comme un générateur dans ce cas.

$$P_{ch} = -P_{bat} \quad (\text{III.26})$$

Notez qu'il existe un autre mode appelé le mode d'arrêt, où il n'y a pas de flux d'énergie entre les composants.

$$P_{ch} = 0 \quad (\text{III.27})$$

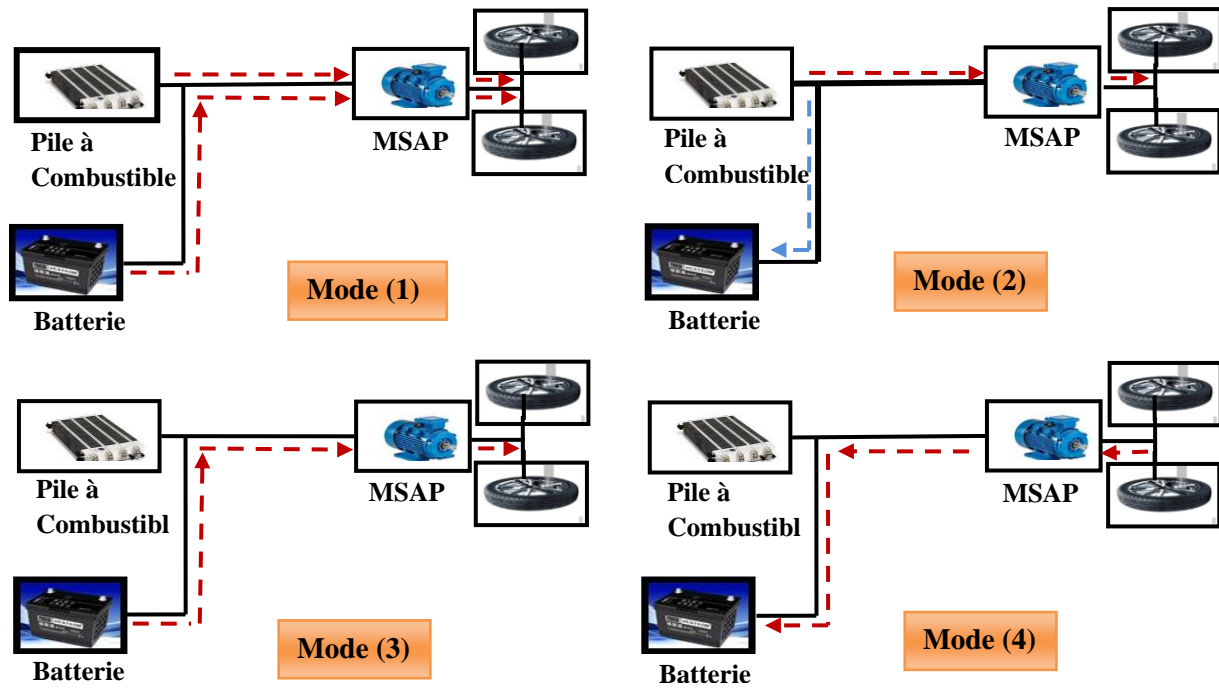


Figure III.10. Différents modes de flux d'énergie

III.4.3. L'organigramme de gestion d'énergie

La figure III.11 est décrit Le schéma proposé du système de gestion de l'alimentation. Il définit en premier lieu les différentes puissances impliquées dans notre système hybride, si la puissance fournie est supérieure à la puissance demandée dans ce cas la puissance excédentaire sera stockée dans la batterie. Si la puissance demandée est supérieure que celle du généré qui nous amène aux deux suivantes cas. Si l'état de charge est supérieur à 30 %, le stockage d'appareils est allumé. Dans le cas contraire, la batterie s'arrête de fonctionner, ce qui oblige la pile à combustible à la charger.

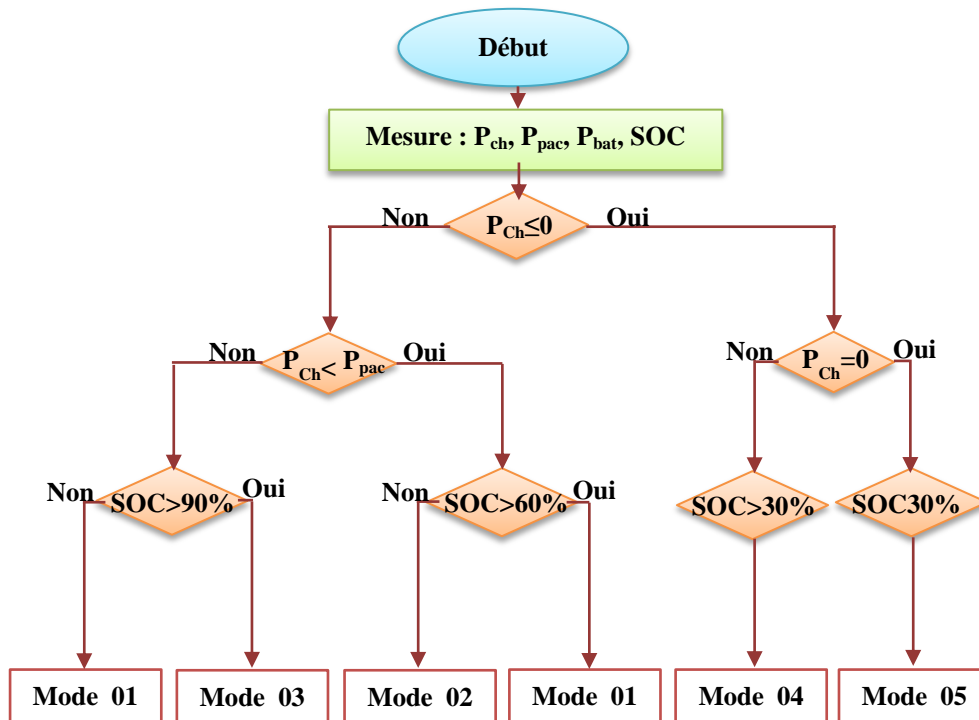


Figure III.11 L'organigramme de Gestion d'Énergie

III.5. Simulation de la Chaîne de Traction

Après présentation des différentes stratégies de commande appliquées aux machines utilisées dans la chaîne de traction d'un véhicule. Une série de tests de simulation a été effectuée sur un moteur synchrone à aimants permanents de 57, 7 kW dont les paramètres sont mentionnés dans l'annexe

Nous avons simulé le fonctionnement de l'ensemble de la chaîne de traction d'un véhicule à l'aide du logiciel MATLAB/Simulink. Le modèle a été testé sur un cycle de 13secondes pendant le fonctionnement en utilisant plusieurs positions de la pédale qui contrôle le régime moteur du véhicule. La figure III.12 montre le schéma global de la simulation d'un système de traction d'un VE.

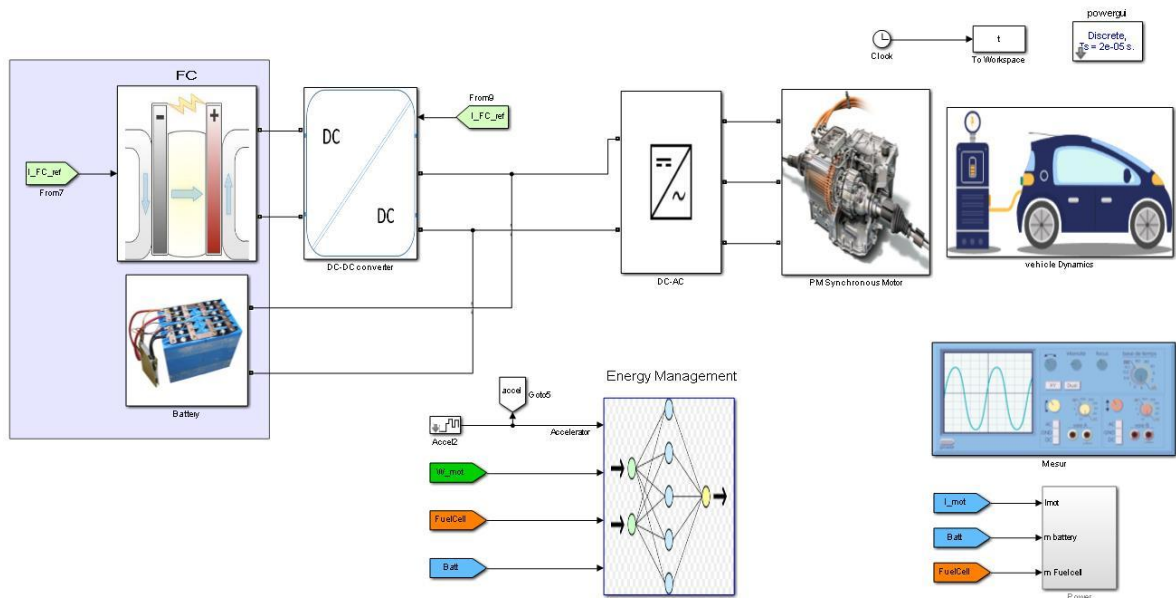


Figure III.12. Schéma Global du Système de Traction d'un VE

III.5.1. Résultats de Simulation de l'Entrainement Electrique

La figure III.13 montre les différentes positions de la pédale du véhicule qui nous permettent de voir les différents modes de fonctionnement du véhicule à savoir le mode de traction, le mode de freinage et le mode d'arrêt. Ce profil impose l'allure de la vitesse du moteur et du couple.

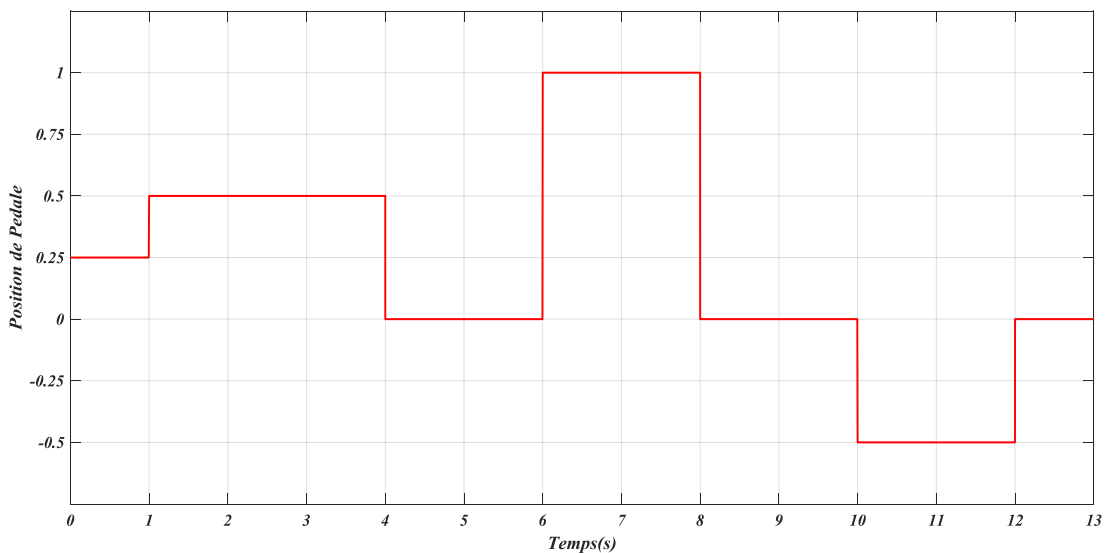


Figure III.13. Position de la pédale

La figure III.14 correspond au couple électromagnétique, la réponse des deux composantes du courant statorique (figure III.16) montre bien le découplage introduit par la commande vectorielle de la machine dont le couple électromagnétique dépend seulement de la composante i_q .

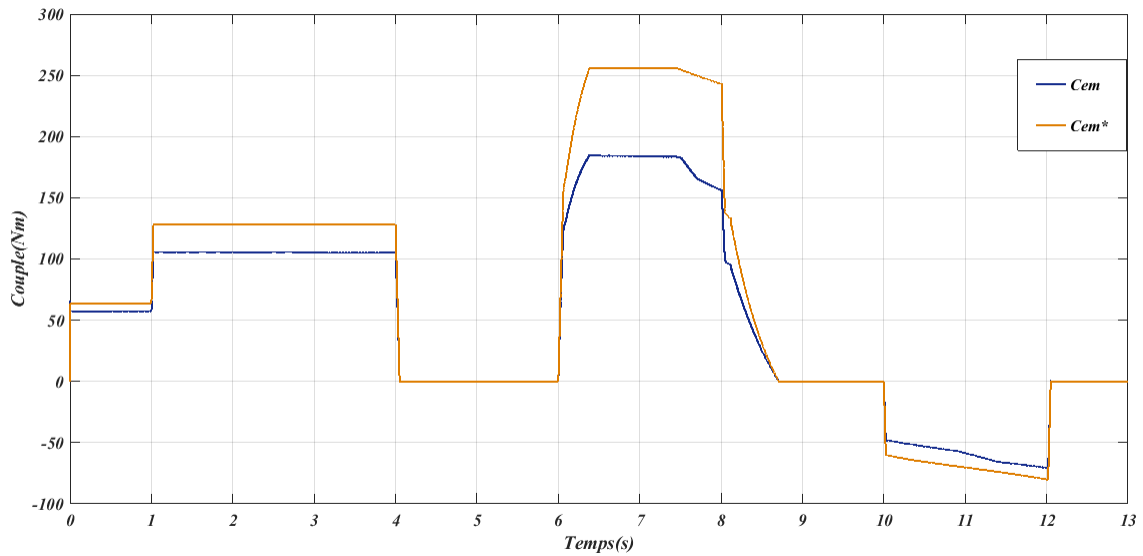


Figure III.14. Couple électromagnétique de la MSAP

La figure III.15 représente l'allure de la consigne de vitesse délivrée par le conducteur via la pédale d'accélération, cette consigne de vitesse est proportionnelle à celle indiquée par la position de la pédale. En outre, nous avons effectué deux manœuvres pour notre véhicule correspondant d'une part marche avant donnant une vitesse maximale (3475tr/min correspondant à $t = 8.5s$) et d'autres part marche en arrière qui nous permet de recueillir une vitesse (-650tr/min correspondant à $t = 12s$).

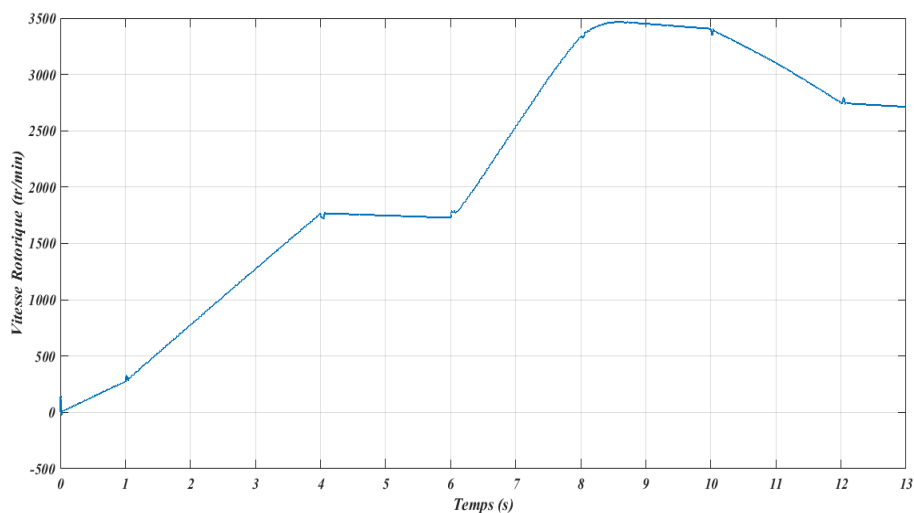


Figure III.15. Vitesse de rotation mécanique du rotor

La figure III.16 expose les variations aux niveaux des courants i_d et i_q lors du changement de la vitesse du véhicule.

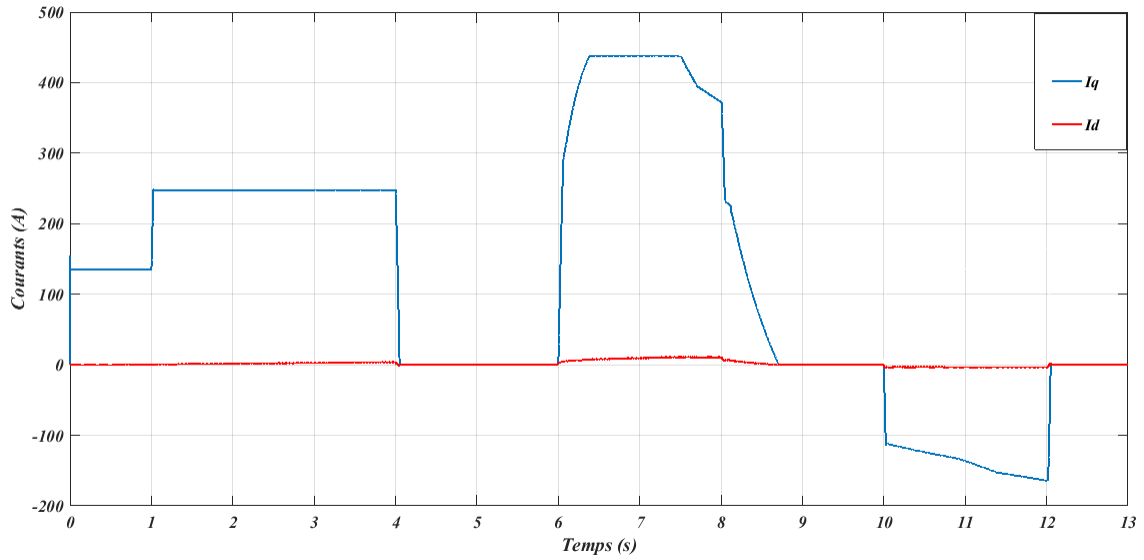


Figure III.16. Courant statorique du msap

La figure III.17 illustre Les courants de phases, ces derniers sont purement sinusoïdaux et présentent des harmoniques réduits sur toute la période du fonctionnement. Il est à noter que le déphasage et le changement d'amplitude des courants statorique sont dus aux changements de l'accélération de la pédale et à l'application d'un couple de charge.

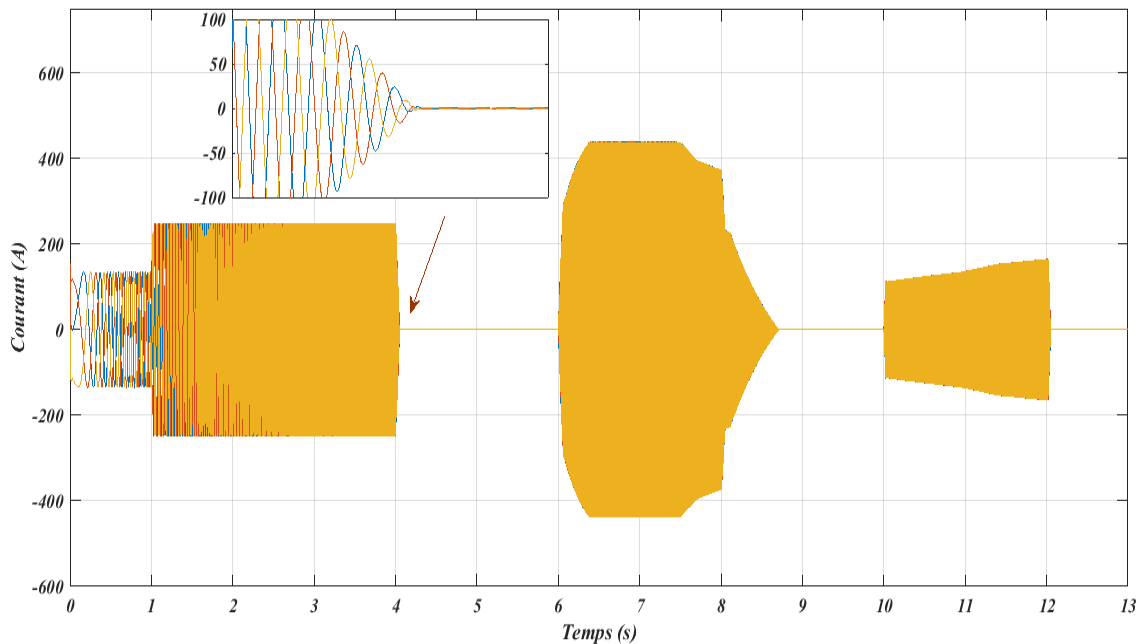


Figure III.17. Courants Statoriques de la MSAP

III.5.2. Résultats de Simulation de la Gestion Energétique

La figure **III.18** montre la tension, le courant et l'état de charge (*SOC*) de la batterie, l'examen de ces courbes illustre que le régulateur boost intervient pour maintenir la tension de la batterie pratiquement constante durant le cycle de fonctionnement ($\Delta U=0.75V$). Cette tension n'est pas altérée par la variation de la puissance demandée. Par contre, la puissance demandée par le moteur présente un effet direct sur le courant de la batterie ($\Delta I=60A$), ce qui explique que le courant est l'image de la puissance. Sur la même figure, dans un intervalle de **13 secondes** qui est considéré très court, la variation de l'état de charge de la batterie est très petite, elle reste pratiquement constante dans une plage d'environ 79 %. Dans le but de garder les bonnes performances de la batterie et garantir l'alimentation du véhicule, le *SOC* sera limité à $SOC_{min}=30\%$ et $SOC_{max}=90\%$.

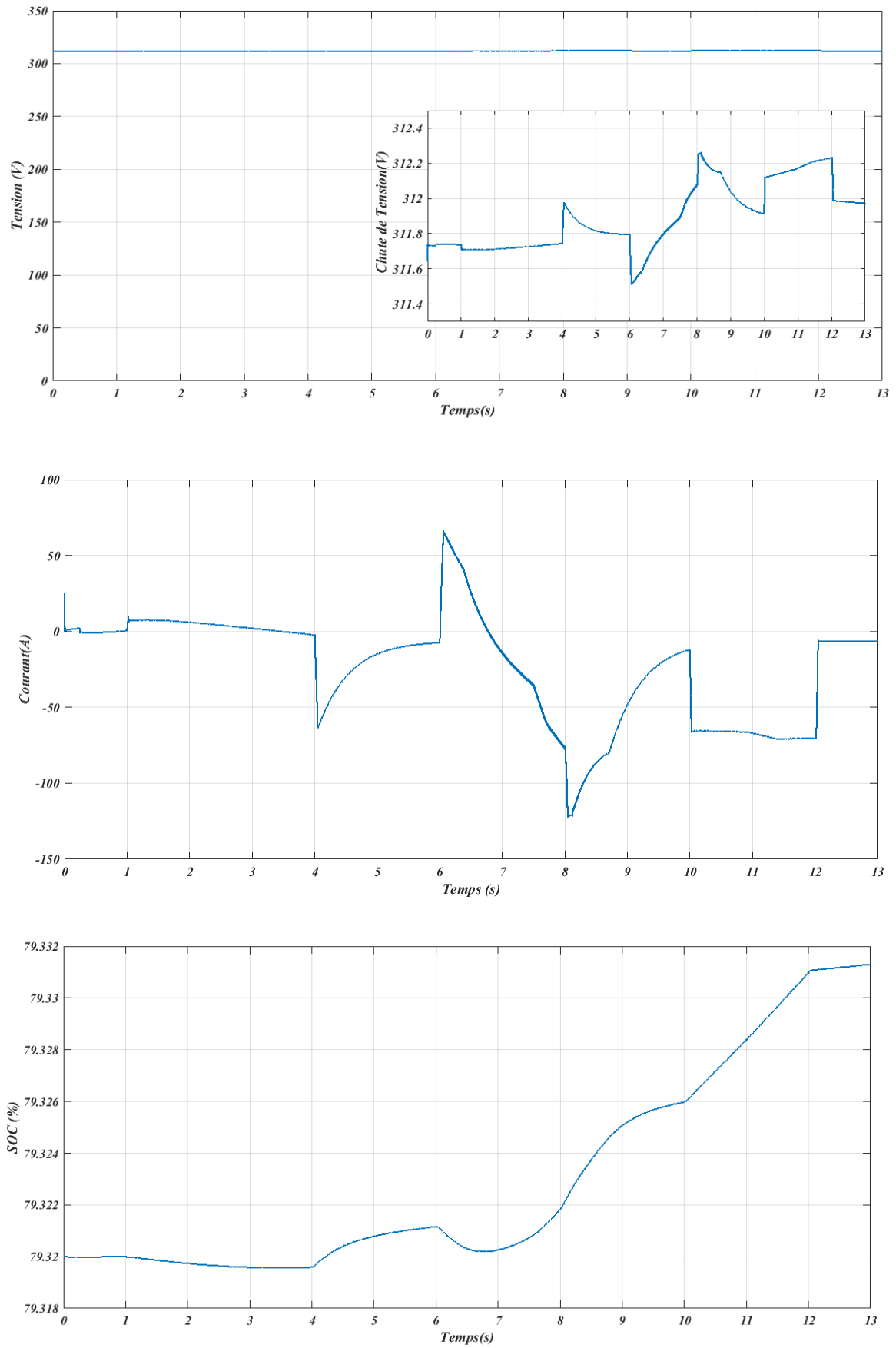


Figure III.18. Tension, courant et état de la charge (SOC) de la batterie

La figure III.19 illustre la tension et le courant délivrés par la PAC, on remarque que la tension de la pile est relativement constante, en revanche le courant fourni par la pile varie proportionnellement avec le changement brusque de la puissance du moteur.

D'après l'analyse des résultats obtenus, on constate que la pile à combustible intervient lors du démarrage dont l'appel du courant est important. De plus, en mode d'arrêt la pile charge la batterie.

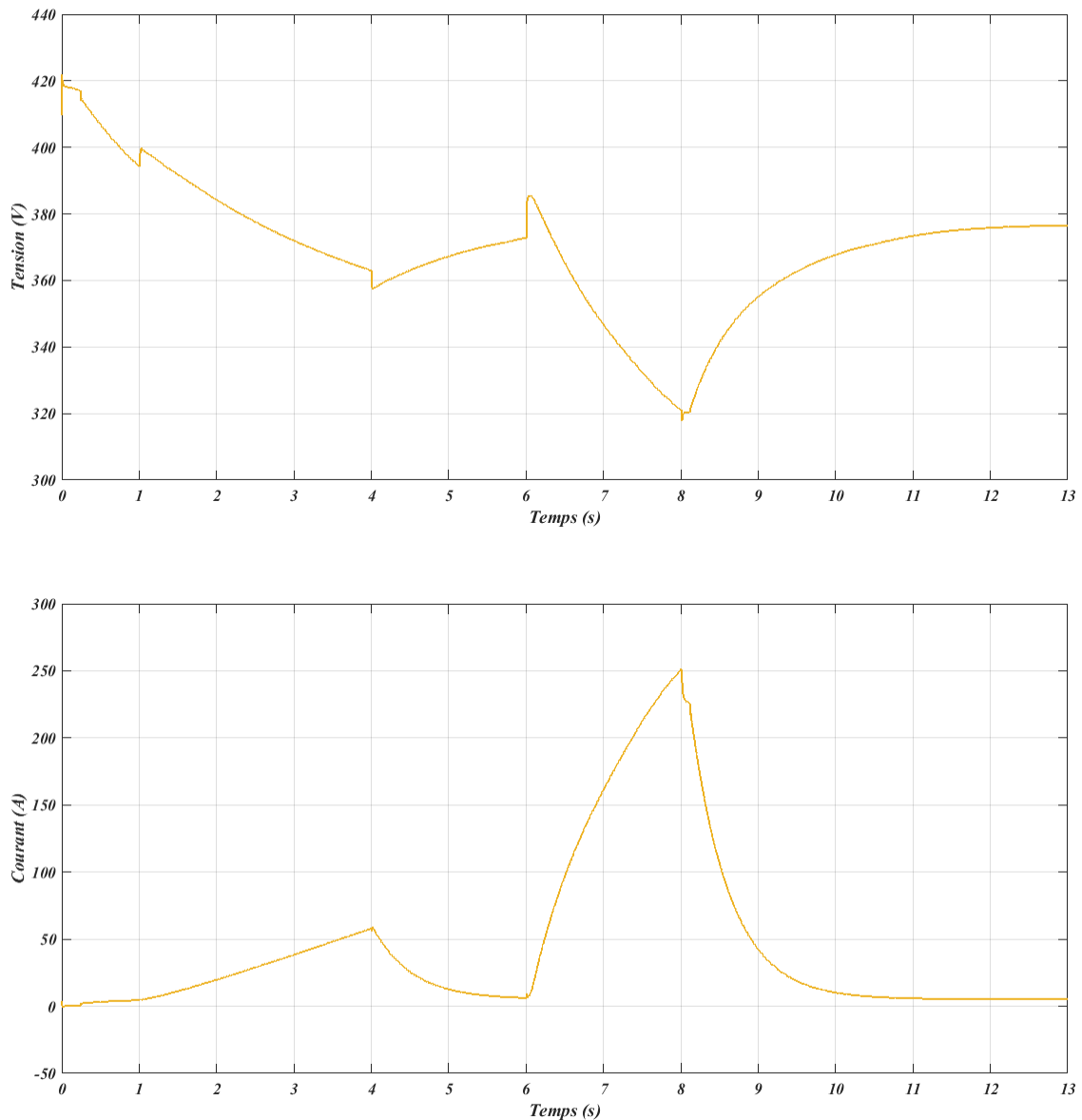


Figure III.19. Tension et Courant de la PAC

La figure III.20 montre le comportement des puissances (batterie, PAC et moteur), la puissance positive correspond à celle donnée au moteur électrique, par contre la puissance négative est celle récupérée aux moments de freinage. La puissance maximale délivrée par la batterie atteint la valeur $26kW$ lors de la forte demande par le véhicule. En mode de traction, la PAC assure la compensation et fournie de l'énergie. Cependant, en mode d'arrêt et cas de besoin en énergie, elle charge la batterie. La PAC sera totalement déconnectée lors du freinage.

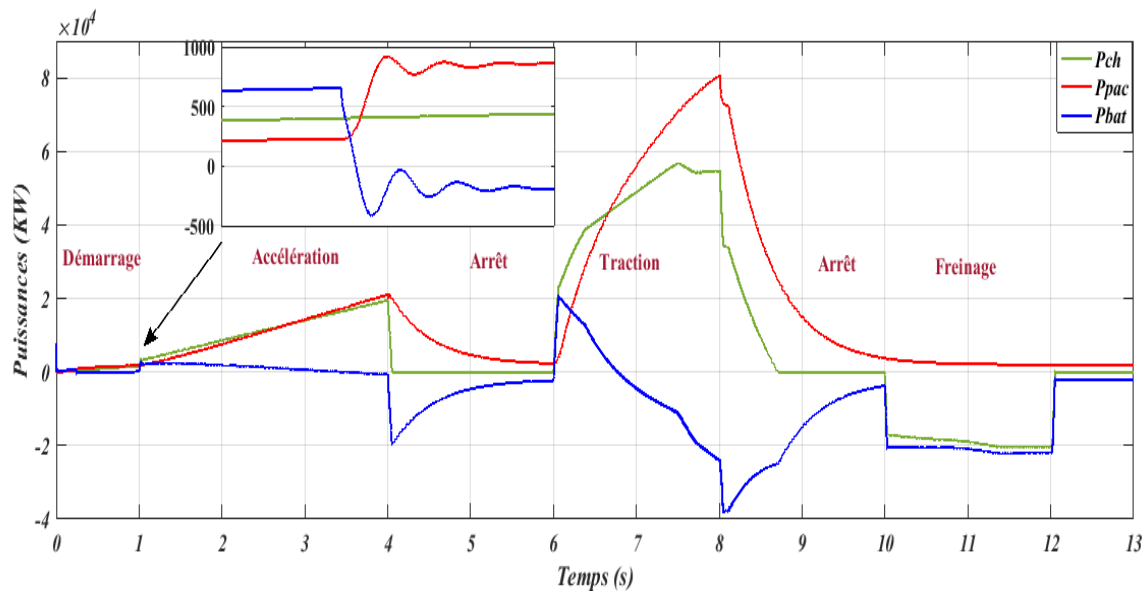


Figure III.20. Puissance du moteur, de la batterie et de la PAC

III.6. Gestion d'Energie de VE par la technique de RNA

III.6.1. Définition de Réseaux de neurones artificiels

Le réseau de neurones artificiels (RNA) est l'une des études de l'intelligence artificielle et est une nouvelle technologie informatique. Le concept central de RNA a été inspiré par la connaissance du système nerveux, en particulier le cerveau humain avec ses neurones étroitement connectés. Le réseau de neurones artificiels (RNA) est l'une des méthodes qui convient pour traiter les relations internes d'un modèle complexe en raison de son traitement parallèle hautement non linéaire et de grandes quantités de données et de sa grande robustesse [70].

Le schéma de la figure.III.21 est la représentation des réseaux de neurones artificiels. Il comprend : (1) la couche d'entrée (variables indépendantes), (2) les couches cachées et (3) la couche de sortie (variable dépendante) :

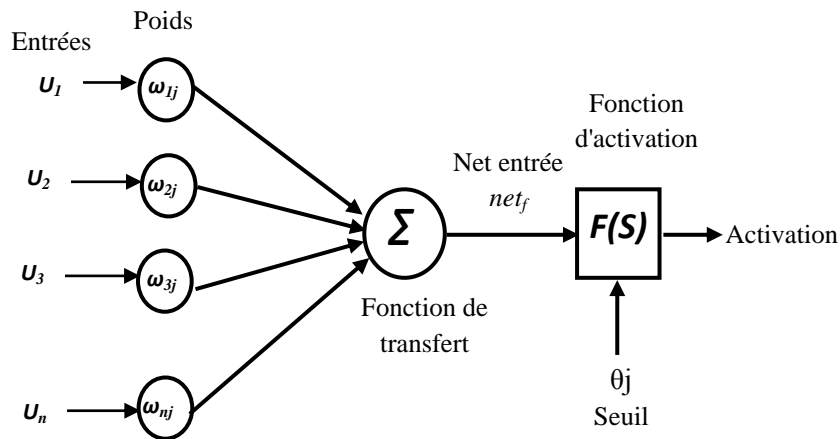


Figure III.21. Représentation Schématique de Réseaux de Neurones Artificiels

III.6.2. Conception et Programmation des Modèles RNA

La conception de modèle RNA suit un certain nombre de procédures systémiques, comme le montre la figure III.22. En général, il y a cinq étapes de base : (1) la collecte des données, (2) le prétraitement des données, (3) la construction du réseau, (4) la formation et (5) le test des performances du modèle.

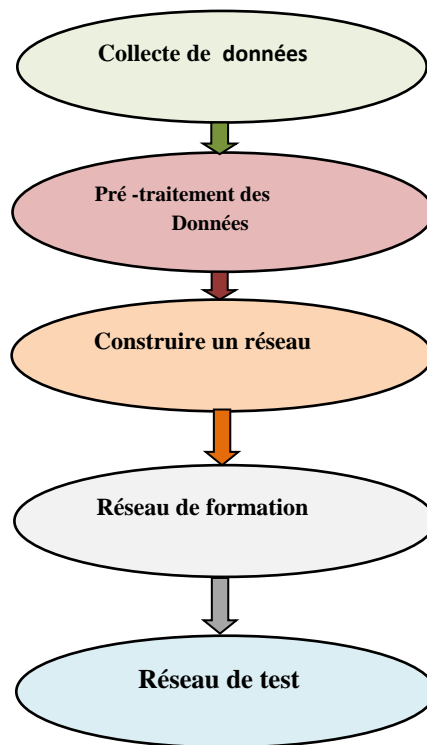


Figure III.22. conception de modèle RNA

III.6.3. Structure du Réseau de Neurones

Il existe des différents types de structure de réseaux de neurone tel que perceptron multicouche, structure neurone de la couche cachée et de la couche de sortie,

III.6.3.1. Perceptron Multicouche

Le multi couche perceptron (MLP "Multi layer Perceptron Neural Network") est le type le plus couramment utilisé comme réseau de neurones artificiels (RNA) à anticipation. Généralement, MLP se compose d'une couche d'entrée, d'une couche cachée et d'une couche de sortie de calcul, la Figure III.23 explique la structure MLP utilisée dans cette étude

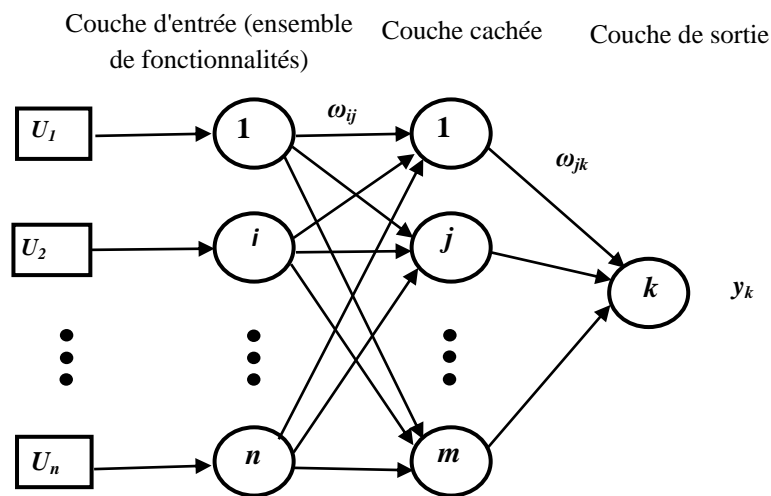


Figure III.23. Structure du réseau Perceptron multicouche

III.6.4. Adaptation des mesures avec les entrées du réseau de neurones

Pour réduire la complexité du réseau de neurones et traiter toutes les valeurs possibles, on peut spécifier comme entrées du réseau de neurones la numérotation des intervalles de variation des grandeurs à mesurer, le **tableau 1** montre l'adaptation des mesures avec les entrées du réseau de neurones et le **tableau 2** présente les sorties du réseau neurone

Tableau III. 1 : Adaptation des mesures avec les entrées du réseau de neurones

Taille mesurée	Intervalle de variation	Numérotation des intervalles (spécification des entrées du réseau neuronal)
P_{ch}	$P_{ch} < 0$	-1
	$P_{ch} = 0$	0
	$P_{ch} > 0$	+1
$P_{ch} - P_{pc}$	$P_{ch} - P_{pc} < 0$	-1
	$P_{ch} - P_{pc} \geq 0$	+1
SOC	$SOC \leq 30\%$	1
	$60\% \geq SOC > 30\%$	2
	$90\% \geq SOC > 60\%$	3
	$SOC > 90\%$	4

Tableau III. 2 : Sorties du réseau neuronal

Mode	Mode 1	1	$P_{ch} = P_{pac} + P_{bat}$
	Mode 2	2	$P_{ch} = P_{pac}$
	Mode 3	3	$P_{ch} = P_{bat}$
	Mode 4	4	$P_{ch} = -P_{bat}$
	Mode 5	5	$P_{ch} = 0$

III.6.5. Structure Finale Utilisée :

La structure finale utilisée pour la base d'entraînement est illustrée par la figure (III.24)

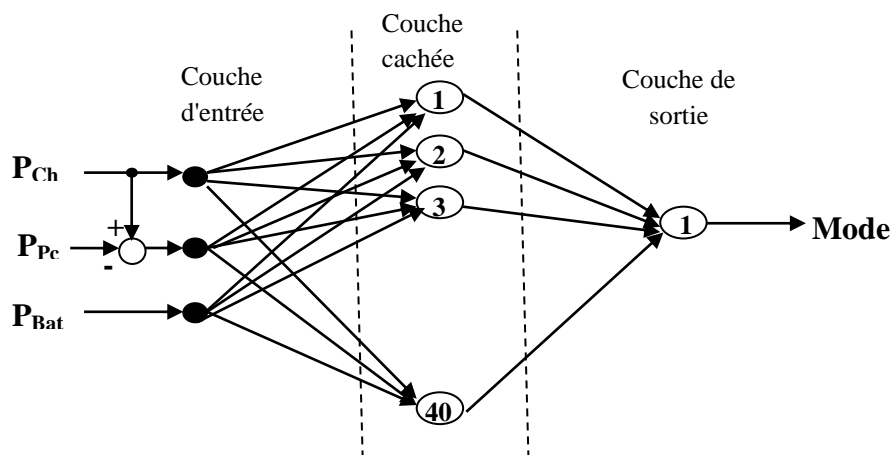


Figure III.24. Structure Finale pour la Base d'Entraînement

Tableau 3: Tableau d'Entraînement

No	P _{Ch}	P _{Ch} -P _{PC}	SOC	Mode
1	-1	-1	1	4
2	-1	-1	2	4
3	-1	-1	3	4
4	-1	-1	4	4
5	-1	+1	1	4
6	-1	+1	2	4
7	-1	+1	3	4
8	-1	+1	4	4
9	0	-1	1	5
10	0	-1	2	5
11	0	-1	3	5
12	0	-1	4	5
13	0	+1	1	5
14	0	+1	2	5
15	0	+1	3	5
16	0	+1	4	5
17	+1	-1	1	2
18	+1	-1	2	2
19	+1	-1	3	1
20	+1	-1	4	1
21	+1	+1	1	1
22	+1	+1	2	1
23	+1	+1	3	1
24	+1	+1	4	3

Après le choix des entrées et de sortie du réseau de neurone sous Windows de commande de Matlab nous avons utilisé l'instruction **nftool**.

La figure III.25 et III.26 montrent l'architecture du RNA et sa fenêtre d'entraînement

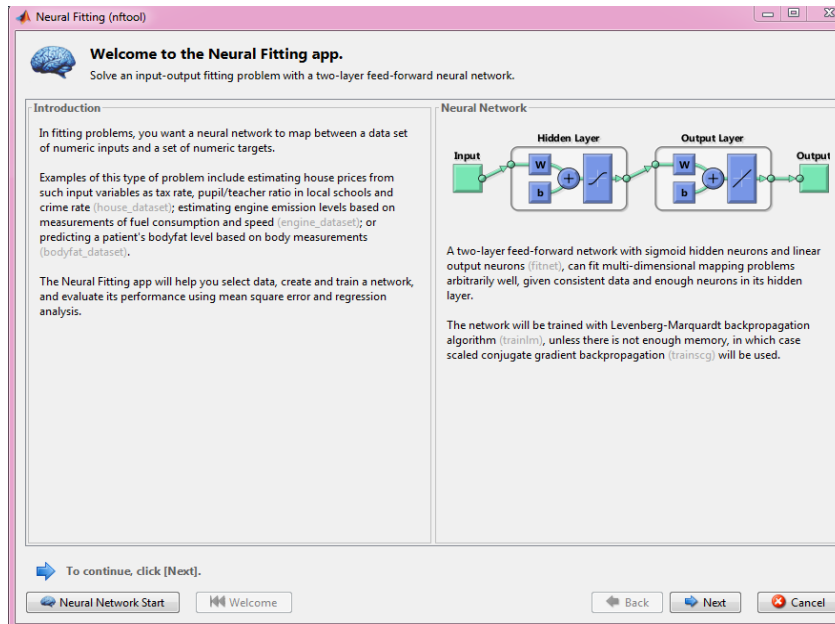


Figure III.25. L'architecture du RNA

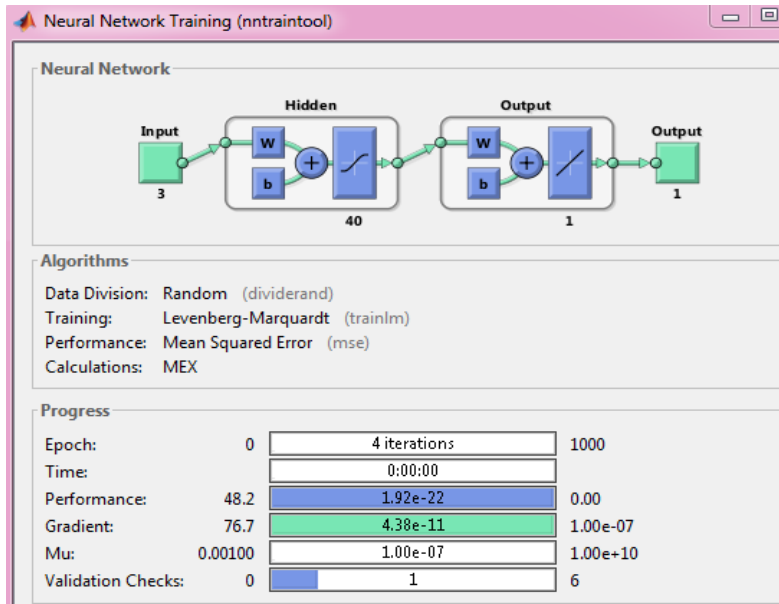


Figure III.26. Fenêtre d'entraînement

III.6.6. Courbes de Régression

Les courbes de régression (figure.III.27) permettent de valider la performance du réseau construit. Les valeurs en ordonnées représentent les sorties du réseau de neurones et les valeurs en abscisses représentent les valeurs désirées.

- Les cercles en noir représentent les valeurs désirées.
- Les droites continues représentent l'approximation faite par le réseau.
- Les droites en pointillé représentent la parfaite approximation.

D'après cette figure nous constatons que :

- Les données de l'apprentissage sont classées à 100%.
- Les données de validation sont classées à 88.56%.
- Les données de test sont classées à 94.25%.
- Globalement les données sont classées à 97.21%.

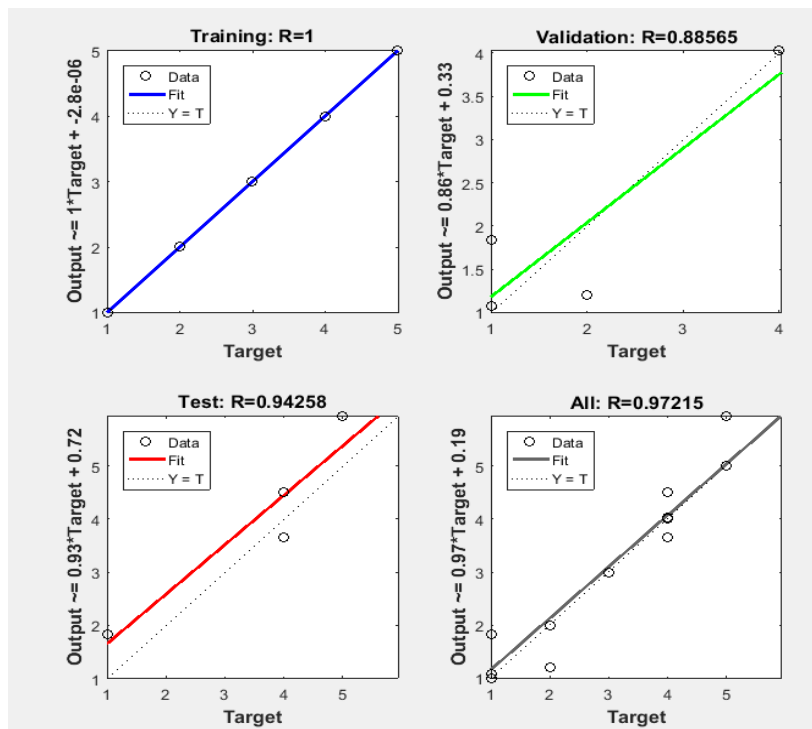


Figure III.27. Courbes de Régressions

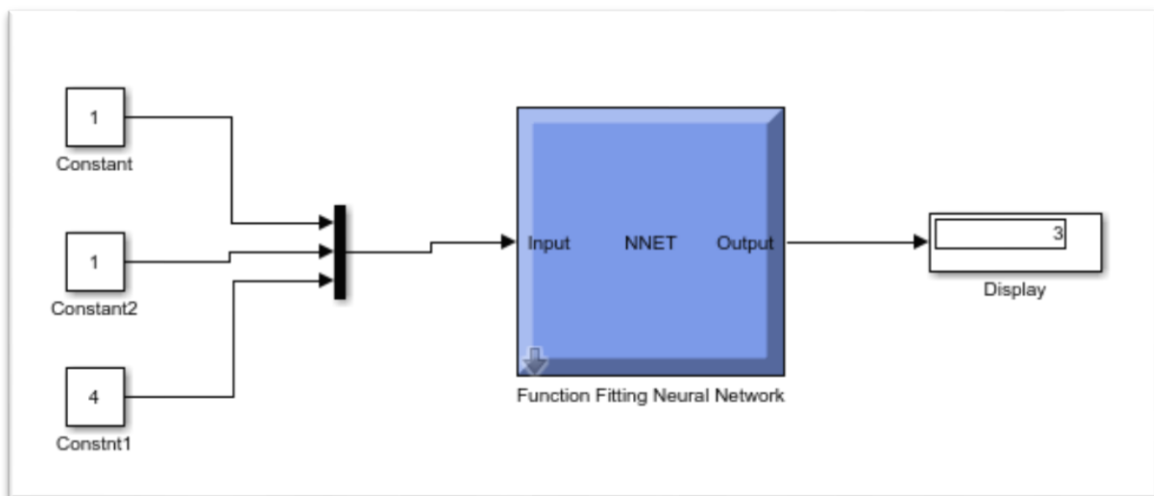


Figure III.28. Diagramme de simulation de RNA

Après la validation des résultats par le diagramme de simulation de la figure (III.28), nous avons implanté ce bloc dans le schéma globale de simulation figure(III.29).

La courbe des modes donnée par l'oscilloscope est montrée par la figure (III.30)

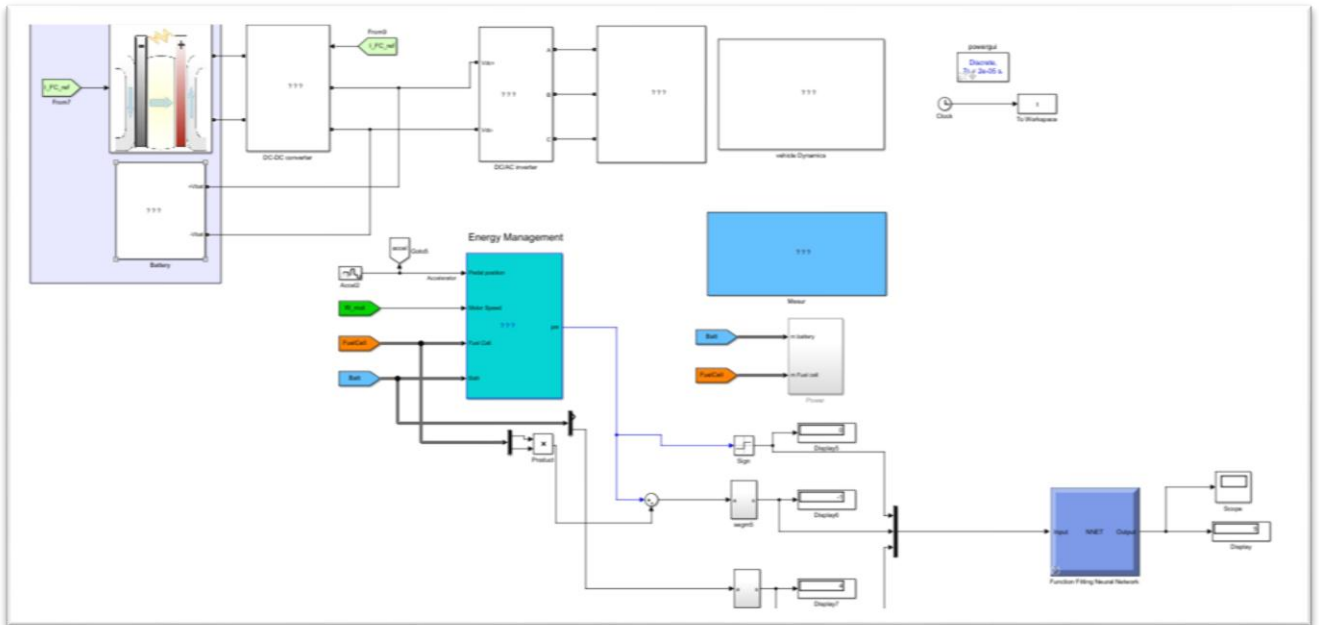


Figure III.29. Implantation de RNA

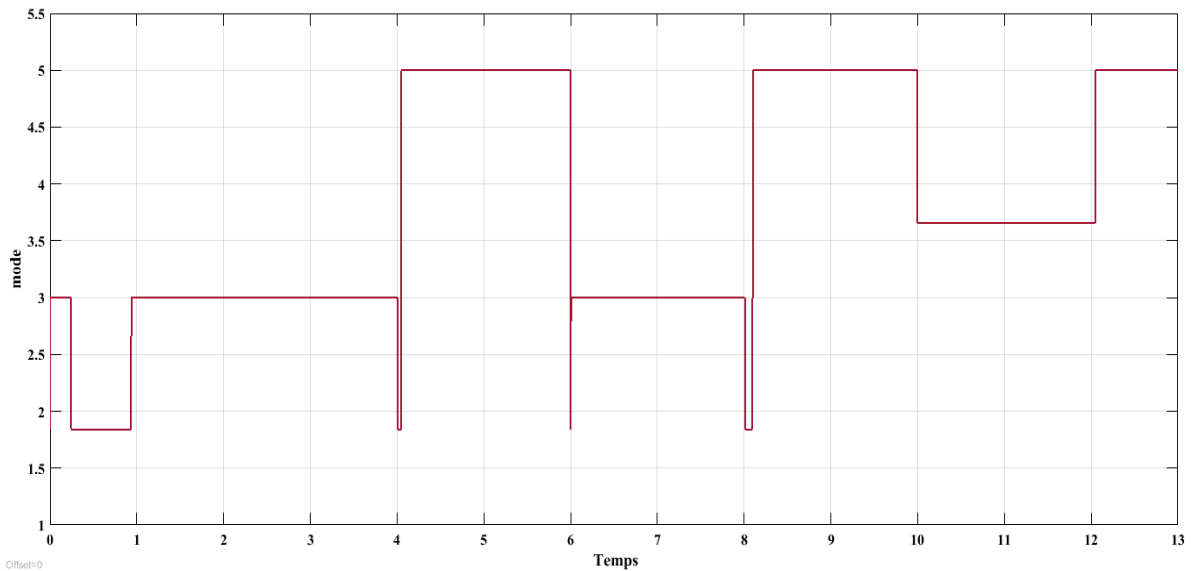


Figure III.30 : Courbe des Modes

III.7. Conclusion

Dans notre chapitre nous avons traité la gestion d'énergie électrique dans un véhicule électrique avec deux sources d'énergie (la PAC pour la production, la batterie pour le stockage)

Une efficacité notable du gestionnaire d'énergie proposé permet de gérer les échanges de flux d'énergie entre les sources et la charge. Par ailleurs, les stratégies de commande proposées RNA peuvent être appliquées dans le domaine des véhicules hybrides, en vue d'améliorer l'autonomie et la stabilité du véhicule.

D'après les résultats de simulation des différents montages on ne constate que la pile à combustible pu délivrer une puissance selon la demande de moteur (*MSAP*)

Conclusion
Générale

Conclusion Générale

Dans la première partie nous avons dressé la situation du VE dans le contexte économique actuel, le but des chercheurs est développer un VE plus performant, plus autonome et avec le moindre impact sur l'environnement.

Nous avons présenté dans le premier chapitre l'état de l'art des véhicules électriques et des généralités sur les constituants de la chaîne de traction des véhicules électriques.

Dans le deuxième chapitre de ce travail, nous avons exposé la modélisation dynamique des constituants de la chaîne de traction.

Dans le troisième chapitre, La commande vectorielle du a été utilisée pour contrôler courant et la vitesse du moteur synchrone à aimants permanents, cette commande est basée sur le régulateur PI conventionnel couramment utilisé. La gestion de l'énergie de la batterie et de la pile à combustible par la technique de réseaux de neurone artificielle est appliquée.

A partir de cette étude nous concluons que :

- La mise en œuvre de la commande vectorielle de la MSAP permet d'avoir un couple proportionnel au courant statorique. Ce qui conduit à un contrôle direct du couple. L'étude de la commande a montré que les résultats sont satisfaisants et le couplage est parfait. La commande de la machine par L'intermédiaire du courant a permis d'améliorer sa dynamique de poursuite et une prise en compte efficace des perturbations. L'intérêt d'une telle stratégie de commande est qu'elle permet de fournir un algorithme de commande partiellement simple qui peut être intégré dans microprocesseur dont la seule grandeur mesurée par les capteurs est la position.
- L'utilisation des réseaux de neurones demeure cependant délicate car il faut d'une part déterminer les « bon » paramètres d'entrée et d'autre part savoir mettre en place le bon réseau de neurones avec le bon nombre de neurones cachés (en couche caché).
- Le réseau de neurone a montré comme technique de l'intelligence artificielle une grande aptitude et efficacité dans la gestion de l'énergie des véhicules électriques.

Le travail élaboré dans notre étude, laisse les portes ouvertes devant d'éventuelles recherches futures. Ainsi, nous proposons nos perspectives de recherche sur :

- ✓ **Implémenter en temps réel le système étudié**
- ✓ **Rajouter un électrolyseur pour produire de l'hydrogène directement sur le site en se servira de surplus d'énergie.**

ANNEXE

Paramètres des Composants Utilisés dans la Partie de Simulation

Les tableaux ci-dessous présentent les différentes caractéristiques de moteur (*MSAP*), la batterie et la *PAC*.

Paramètres de MSAP

Composantes	Valeurs de notation
Puissance nominale	57 kW
Résistance de Stator	$R_s = 0.0083 \Omega$
fréquence	$f = 50 \text{ Hz}$
Inductance	$L_d = 0.1741 \text{ mH}, L_q = 2,92 \text{ mH}$
Flux induit par les aimants	$\psi_f = 0.0711151 \text{ Wb}$
Nombre de paires de pôles	$p = 4$

Paramètres de la batterie

Composantes	Valeurs de notation
Tension nominale	$V = 288 \text{ V}$
Capacité	$C_n = 678.260 \text{ Ah}$
Résistance interne	$R = 0.00384 \Omega$

Paramètres du PAC

Composantes	Valeurs de notation
Résistance aux PAC	$R_m = 0.017572 \Omega$
Tension de Nernst d'une cellule	$E_{nerst} = 1.1729 \text{ V}$
Puissance de pile nominale	$P = 85.5 \text{ kW}$

Bibliographie

- [1] **S. Caux, Y. Caoua, et P. Lopez**, « A combinatorial optimisation approach to energy management strategy for a hybrid fuel cell vehicle Energy », 133:219–230, 2017.
- [2] **A. Nouche** « Contribution au développement d'un Simulateur pour les véhicules électriques routiers », thèse doctorat, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, génie électrique, 2008
- [3] **A.V. Sant et K. Rajagopal**, «Pm synchronous motor speed control using hybrid fuzzy-pi with novel switching functions», IEEE Transactions on Magnetics, 45(10):4672–4675, 2009.
- [4] **X. Zhang, L. Sun, K. Zhao, et L. Sun**. «Nonlinear speed control for pmsm system using sliding-mode control and disturbance compensation techniques», IEEE Transactions on Power Electronics, 28(3):1358–1365, 2013.
- [5] **S. Maakaroun**. « Modélisation et simulation dynamique d'un véhicule urbain innovant en utilisant le formalisme de la robotique», PhD thèses, 2011.
- [6] **H. Benariba**, «Contribution à la commande d'un véhicule électrique», PhD thèses, 2018.
- [7] **A. Daanoue**, «Contribution à l'Etude et à l'Optimisation d'une Machine Synchrone à Double Excitation pour Véhicules Hybrides», PhD thèses, 2012.
- [8] Tesla (automobile).
- [9] **LAMY, C. et LÉGER, J.-M.** Les piles à combustible: application au véhicule électrique. Le Journal de Physique IV, 1994, vol. 4, no C1, p. C1-253-C1-281.
- [10] Fiche technique Ultracondensateurs série K2, 2015. Maxwell Technol.
- [11] **A. Burke**, «Ultra condensateurs : pourquoi, comment et où est la technologie. J. Sources d'alimentation», 91, 3750, 2000.
- [12] **H. Liu, J. Jiang**, «Le stockage d'énergie du volant d'inertie, une technologie en plein essor pour la durabilité énergétique. Construire de l'énergie». 39 (5), 599604. 2007
- [13] **B. Bolund, H. Bernhoff, M. Leijon**, «Systèmes de stockage d'énergie et d'énergie du volant d'inertie. Renouveler». 11 (2), 235258. 2007.
- [14] **Xu, Y., Pi, H.W., Ren, T.Q., Yang, Y., Ding, H.F., Peng, T., et al.** «Conception d'un système multi pulse à champ magnétique élevé basé sur le stockage d'énergie du volant d'inertie», IEEE 26 (4), 5207005. 2016.
- [15] **Wikipédia**. Générateur thermoélectrique, https://en.wikipedia.org/wiki/Automotive_thermoelectric_generator. (Consulté en février 2019).
- [16] **G. Souffran** « dimensionnement de la chaîne de traction d'un véhicules électrique hybride basé sur une modalisation stochastique de ses profils de mission », thèse doctorat, Université de Nantes, 2012.
- [17] **C. Chan**, «L'état de l'art des véhicules électriques et hybrides », Proc. IEEE vol. 90 (n° 2), 247 275. 2002
- [18] **K. Rajashekara**, «État actuel et tendances futures des technologies de propulsion des véhicules électriques», IEEE J. Emerg. Sécl. Haut. Électron de puissance. 1, 3 10. 2013.

- [19] **K. Amor**, “Contribution à la Commande Vectorielle sans Capteur Mécanique des Machines Synchrones à Aimants Permanents (MSAP),” Thèse doctorat, Université Aix Marseille, 2012.
- [20] **XD. Xue, KWE Cheng, et NC. Cheung**. «Selection of electric motor drives for electric vehicles. In 2008 Australasian», Universities Power Engineering Conference, pages 1–6. IEEE, 2008.
- [21] **M.A. Hannan, F.A. Azidin, A. Mohamed**, «Les véhicules électriques hybrides et leurs défis : un bilan. Renouveler. Soutenir. Énerg. Rév». 29, 135 150. 2014.
- [22] **S.F Tie, C.W. Tan**, «Examen des sources d'énergie et du système de gestion de l'énergie dans les véhicules électriques. Renouveler. Soutenir. Énergie Rév». 20, 82 102. 2013
- [23] **D Smith**. Electric vehicle types. .Com/the-utility-room/savingmoney-using-less/Electric-vehicle-types,2017
- [24] **B. Michael**, «The Electric Car Guide ». Edition Green steam, 2015.
- [25] **B. Pollet, G. Staffelli, J.L. Shang**, « État actuel des véhicules électriques hybrides, à batterie et à pile à combustible : de l'électrochimie aux perspectives du marché». Electrochimie. 84, 235 249. 2012
- [26] **Y. Gao, M. Ehsani**, «Méthodologie de conception et de contrôle des véhicules électriques hybrides rechargeables». IEEE Trans. Ind. Électron. 57, 633 640. 2010.
- [27] **E.A. Nanaki, C.J. Koroneos**, «Atténuation du changement climatique et déploiement des véhicules électriques dans les zones urbaines», J. Energie Renouveler. 99, 1153 1160. 2016.
- [28] **O.M.F. Camacho, L. Mihet-Popa**, «Tests de charge rapide et charge intelligente des batteries de véhicules électriques utilisant les énergies renouvelables», 71, 13 25. 2016.
- [29] **A. Emadi, K. Rajashekara, S.S Williamson, & S.M. Lukic**, «Vue d'ensemble topologique des architectures et des configurations des systèmes d'alimentation des véhicules hybrides électriques et à pile à combustible. Technologie des véhicules», IEEE Transactions on, 54(3), 763-770. 2005.
- [30] **T.D. Nguyen, S. Li, W., Mi, C.C.** «Étude de faisabilité sur des pads bipolaires pour des chargeurs de puissance sans fil efficaces. Dans: Actes de la vingt-neuvième conférence et exposition annuelles sur l'électronique de puissance appliquée de l'IEEE (APEC), pp. 1676 1682. 2014.
- [31] **S. Metha**, «Rapport sur l'état des véhicules électriques rechargeables/véhicules électriques», Electro. ING. 1 15. 2010.
- [32] **C. Sevilay, Y. Veli**, «Performance evaluation of constant current and constant voltage charge control modes of an inductive power transfer circuit with double-sided inductor-capacitor-capacitor and inductor-capacitor/series compensations for electrical vehicle battery charge applications», Transactions de l'Institut de mesure et de contrôle, 2021, vol. 43, no 8, p. 1710-1721.
- [33] **BUISSON, Christine et PELISSIER, Serge**. Impacts environnementaux des véhicules thermiques, électriques, autonomes ou automatisés: Comment les quantifier?. In : *49ème Congrès ATEC ITS France*. 2022.

- [34] **FRAJJI, Yosra.** Stratégies de sécurité contextuelle sous contrainte énergétique pour le réseau intra Véhicule Electrique. 2021. Thèse de doctorat. Normandie.
- [35] **C.B. Robledo, V. Oldenbroek, F. Abbruzzese, A.J.M. Van Wijk,** «Intégration d'un véhicule électrique à pile à combustible à hydrogène avec la technologie véhicule-réseau, l'énergie photovoltaïque et un bâtiment résidentiel. Appl. Énergie», 215. 2018
- [36] **T. Lindeman, J. Pearson, E.I. Maiberg,** «Les autobus scolaires électriques peuvent servir de batteries de secours pour le réseau électrique américain. », 2018.
- [37] **A.K. Srivastava, B. Annabathina, S. Kamalasadana,** «Les défis et les options politiques pour intégrer le véhicule électrique hybride rechargeable dans le réseau électrique». Électr. J. 23 (3), 83 91, 2010
- [38] **T. Ohtaka, A. Uchida, S. Iwamoto,** «Une stratégie de contrôle de tension avec des systèmes de batterie NAS tenant compte de l'interconnexion des générations distribuées. Dans : Actes de la Conférence internationale sur la technologie des systèmes électriques (PowerCon) ». Pages 226-231, 2004.
- [39] **M. Ehsani, M. Milad Falahi, S. Lotfifard,** «Services véhicule-réseau : potentiel et applications. Énergies» 5 (10), 4076 4090, 2012.
- [40] **R. Rütther, L. Drude, L.C. Pereira Jr,** «Stratégies photovoltaïques (PV) et véhicules électriques-to-grid (V2G) pour la réduction de la demande de pointe dans les régions urbaines du Brésil dans un environnement de réseau intelligent. Renouveler. Énergie» 68, 443-451, 2014.
- [41] **Z. Ma, D.S. Callaway, I.A. Hiskens,** «Contrôle de charge décentralisé de grandes populations de véhicules électriques rechargeables», IEEE Trans. Contrôler. Syst. Technol. 21 (1), 67-78. 2013.
- [42] **M. Ismail A. Hichem,** «La commande en vitesse d'un véhicule électrique». Thèses, Université de Tlemcen.
- [43] **S. Guenidi,** « Modélisation, Commande Et Gestion De L'énergie D'un Véhicule Electrique Hybride », Mémoire de Magistère, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, 2011.
- [44] **S. Meziani , A.Bourenane,** « Contrôle par logique floue d'une chaine de traction d'un véhicule électrique basé sur une machine asynchrone à double alimentation », Mémoire de master, Université Abderahmane Mira Bejaia, 2013.
- [45] **CANDUSSO, Denis.** Hybridation du groupe électrogène à pile à combustible pour l'alimentation d'un véhicule électrique. 2002. Thèse de doctorat. Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG.
- [46] **J. Han, J.F. Charpentier, T. Tang,** « An energy management system of a fuel cell/battery hybrid boat. Energies », 7(5): 2799-2820. 2014.
- [47] **P. Garcia, J. Torreglosa, L. M. P. Fernandez, F. Jurado,** « Improving long-term operation of power sources in off-grid hybrid systems based on renewable energy, hydrogen and battery». Journal of Power Sources, 265: 149-159. 2014.
- [48] **A. Elbaset,** « Design, Modeling and Control Strategy of PV/FC Hybrid Power System». Journal of Electrical System 7(2): 270-286. 2011.

- [49] **P. Thounthong, A. Luksanasakul, P. Koseeyaporn**, « Intelligent model-based control of a standalone photovoltaic / fuel cell power plant with supercapacitor energy storage». *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 4(1): 240-249. 2013.
- [50] **V. Lakhchmi, V. Vijaya et Chennakesavulu**, « Réduction harmonique du Buck non inverseur booster le convertisseur dc / dc en introduisant des filtres LC dans le réseau».
- [51] **Mr. ZEMOURI Azzedine**, « Etudes expérimentales d'un convertisseur DC/DC contrôler par une commande robuste », Mémoire de Magister, Université de Batna, 2014.
- [52] **N. Sanhadji, A. Chalabi**, « Commande du moteur synchrone a aimants permanents par Backstepping, Mémoire de master », Université Abou Bekr Belkaid - Tlemcen, Juin 2015.
- [53] **F. Boussekra**, « La commande non linéaire à régime glissant de la MSAP, Mémoire de magister », Université de Batna, Novembre 2011.
- [54] **M. Mahgoun**, « Application de la commande aux systèmes linéaires perturbés, Mémoire de Magister », Université Ferhat Abbas de Setif, Octobre 2012.
- [55] **M.Loucif**, « Synthèse de lois de commande non-linéaires pour le contrôle d'une machine asynchrone à double alimentation dédiée à un système aérogénérateur », Thèse de doctorat, Université Abou Bekr Belkaid - Tlemcen, Mai 2016.
- [56] **N. Bounasla**, « Commande par Mode de Glissement d'Ordre Supérieur de la Machine Synchrone à Aimants Permanents, Mémoire de magister », Université Ferhat ABBAS Sétif 1,2014.
- [57] **A. Tahri and M. Hadjmhamed**, « Amélioration de l'alimentation du moteur asynchrone par l'utilisation de l'onduleur MLI, » Mémoire d'ingénieur, Université Mohamed Bouguerra, Boumerdes, 2007.
- [58] **R. Trigui, F. Harel, B. Jeanneret, F. Badin, S. Dérou**, « Optimisation globale de la commande d'un moteur synchrone à rotor bobiné. Effets sur la consommation simulée de véhicules électriques et hybrides », *GEVIQ'2000.*, pp. 21–22, 2000.
- [59] **S. R. Jape et A. Thosar**, « COMPARISON OF ELECTRIC MOTORS FOR ELECTRIC VEHICLE APPLICATION *IJRET* », eISSN: 2319-1163, pp. 12–17, 2017.
- [60] **A. DJELLIKH , S. HAOUACHI**, « Commande d'un Moteur Synchrone à Aimant Permanant Par une DTC à SVM Jury »,Mémoire de master, Université Amar Thelidji, Laghouat, 2016.
- [61] **D. Lahouel**, « Commande Non Linéaire Adaptative D'une Machine Synchrone à Aimants Permanents, Mémoire de magister », Université de Batna, Juillet 2009.
- [62] **A. Laguidi**, « Réalisation, Conception et Commande d'un Véhicule Electrique », Mémoire Magister Université de Béchar, 2011.
- [63] **A. Miguel Ortega-Vazquez**. «Optimal scheduling of electric vehicle charging and vehicle to-grid services at household level including battery degradation and price uncertainty.*IET Generation, Transmission & Distribution*», 8(6) :1007–1016, 2014.

- [64] **Hanane Hemi**. « Optimisation énergétique en temps réel d'un véhicule à pile à combustible et supercondensateurs ». PhD thèses, Université du Québec à Trois-Rivières, 2015.
- [65] **N. Sanhadji , A. Chalabi**, « Commande du moteur synchrone a aimants permanents par Backstepping », Mémoire de master, Université Abou Bekr Belkaid - Tlemcen, Juin 2015.
- [66] **Quntao An, Jin Liu, Zhuang Peng, Li Sun, and Lizhi Sun**. « Dual-space vector control of open-end winding permanent magnet synchronous motor drive fed by dual inverter. IEEE Transactions on Power Electronics », 31(12) :8329–8342, 2016.
- [67] **N. Bounasla**, « Commande par Mode de Glissement d'Ordre Supérieur de la Machine Synchrone à Aimants Permanents », Mémoire de magister, Université Ferhat ABBAS Sétif -1, 2014
- [68] **Stephanie Stockar, Vincenzo Marano, Marcello Canova, Giorgio Rizzoni, and Lino Guzzella**. « Energy-optimal control of plug-in hybrid electric vehicles for real-world driving cycles. IEEE Transactions on Vehicular Technology », 60(7) :2949–2962, 2011.
- [69] **T. Matsumoto, N. Watanabe, H. Sugiura, T. Ishikawa**, « Development of fuel-cell hybrid vehicle ». SAE Technical Paper , 2002.
- [70] **BROUILLARD, Philippe**. « Apprentissage de modèles causaux par réseaux de neurones artificiels ». 2021

يرتكز مشروعنا على السيارة الكهربائية والتي محركها يتغذى فقط على الطاقة الكهربائية, في المحور الأول قمنا بنمذجة مكونات سلسلة جر السيارة الكهربائية بما في ذلك محركها المتزامن ذو المغناطيس الدائم MSAP في المحور الثاني قمنا بوضع منظمات تقليدية PI للتحكم في محرك السيارة MSAP ثم قمنا بوضع شبكة العصبونات الاصطناعية للتسيير الأفضل للطاقة الموزعة للسيارة الكهربائية باختلاف مصادرها (بطارية, خلية الوقود) **كلمات مفتاحية:** سيارة كهربائية VE, VEH, نمذجة ديناميكية MSAP, RNA, PI, إدارة الطاقة

Résumé

Notre projet est basé sur le véhicule électrique où son moteur est alimenté uniquement par l'énergie électrique. Le premier axe de ce travail est consacré à la modélisation dynamique des constituants de la chaîne de traction de VE dont son moteur est une machine synchrone à aimant permanent MSAP. Dans le deuxième axe nous avons utilisé le régulateur classique PI pour contrôler le MSAP de VE puis nous avons utilisé la technique de réseaux de neurone artificielle pour la gestion optimale d'énergie électrique de la pile à combustible et de la batterie du VE

Mot clés : véhicule électrique VE, VEH, Modélisation dynamique, MSAP, PI, RNA, Gestion d'énergie

Abstract

Our project is based on the electric vehicle whose motor is powered solely by electric energy. The first axis of this work is devoted to the dynamic modeling of the constituents of the EV traction chain whose motor is a permanent magnet synchronous machine. In the second axis we used the classic regulator PI to control the EV MSAP and then we used the technique of artificial neural networks for the optimal management of electrical energy from the fuel cell and the EV battery.

Key words: Electric vehicle, HEV, Dynamic, Modeling, permanent, magnet synchronous machine, PI, ANN, Energy management