



Mémoire de fin d'étude

Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur

Filière : Électrotechnique

Spécialité : Energies Renouvelables et Environnement

Présenté par : Khouloud Zohra MAHREZ

Feryal Amina NEGADI

Gestion d'énergie et contrôle d'un véhicule électrique intégrant des sources d'énergie hybrides

Soutenu publiquement, le 02/07/2024 , devant le jury composé de:

| | | | |
|----------------------------|---------------------|---------------|--------------|
| Mr. Belarouci.S | Maitre conférence B | ESSA. Tlemcen | Président |
| Mme. BOUSMAHA Imen Souhila | Maitre conférence A | ESSA. Tlemcen | Encadrant |
| M. GHEZOUANI AEK | Docteur | ESSA. Tlemcen | Co-Encadrant |
| Mr. Mebrouki. M | Maitre conférence A | ESSA. Tlemcen | Examineur |
| Mr. Oudjama. F | Maitre assitant B | ESSA. Tlemcen | Examineur |

Année universitaire : 2023 / 2024



Remerciement

C'est avec une immense gratitude et un profond respect que nous souhaitons exprimer nos sincères remerciements à toutes les personnes qui ont rendu possible la réalisation de ce projet de fin d'études.

Nous souhaitons avant tout exprimer notre profonde gratitude envers Dieu, le Tout-Puissant, pour nous avoir donné la force, la volonté et la patience nécessaires tout au long de nos années d'études, et pour nous avoir permis de mener ce travail à bien.

Nous tenons à remercier chaleureusement notre co-encadreur, monsieur Abdelkader GHEZOUANI, pour son encadrement exceptionnel, ses précieux conseils et sa disponibilité constante. Son expertise et ses encouragements ont été déterminants pour le succès de ce travail.

Nous adressons également nos remerciements les plus sincères à notre encadreur, madame Imen BOUSMAHA, pour son encadrement, son assistance et ses orientations constructives.

Un grand merci à l'ensemble de nos enseignants qui nous ont enseigné tout au long de notre parcours académique. Nous sommes infiniment reconnaissants pour leurs efforts, leur patience et leur soutien inconditionnel. Leur dévouement à l'enseignement et leur engagement envers nos succès académiques méritent d'être salués.

Nos vifs remerciements vont naturellement à Mr Belarouci pour l'honneur qu'il nous a fait en acceptant la présidence du jury de ce mémoire. Ainsi qu'à tous les membres du jury, Mr Mebrouki et Mr Oudjamaa pour leur aimable participation à l'évaluation de ce travail. Votre temps, vos efforts et vos précieux commentaires sont vivement appréciés.

Enfin, nous dédions ces remerciements à nos familles, pour leur amour, leur patience et leur soutien inconditionnel. Leur confiance et leurs encouragements nous ont donné la force et la détermination nécessaires pour mener à bien ce projet.

Que Dieu bénisse tous ceux qui ont été impliqués et nous ont aidés à atteindre ce stade.



Dédicace

C'est avec une profonde émotion et une immense joie que je dédie ce mémoire à mes chers parents. Leur amour infini et leurs précieux conseils ont été les fondements de mon succès. Leur soutien indéfectible et leurs prières constantes m'ont accompagné tout au long de mon parcours scolaire, m'encourageant à chaque étape. Merci pour votre affection inépuisable et votre encouragement sans faille.

A ma mère

Source inépuisable de tendresse, de patience et de sacrifices, votre soutien a été un pilier inébranlable tout au long de ma vie. Vos prières et bénédictions m'ont apporté une aide précieuse à chaque étape de mon parcours. Aucun mot ne pourrait exprimer pleinement la profondeur de mon affection et de ma reconnaissance. Vous êtes et vous resterez pour moi la lumière qui illumine mon chemin. Mon plus grand souhait est de toujours être à la hauteur de votre confiance et de vos sacrifices. Que Dieu Tout-Puissant vous accorde santé, longue vie et bonheur.

A mon père

Vous êtes, de tous les pères, le meilleur. Aucun mot ne saurait exprimer pleinement ma gratitude et mon profond amour pour vous. Que Dieu vous préserve et vous accorde santé et bonheur. Vous êtes et resterez toujours ma référence. Ce travail est le fruit de votre esprit de sacrifice, de vos encouragements constants et de votre soutien indéfectible. J'espère que vous y verrez les fruits de votre dévouement et la preuve de ma grande fierté de vous avoir comme père.

A ma chère amie et binôme

Je dédie également ce projet à ma chère amie et binôme Ferial NEGADI. Partager cette aventure académique avec vous a été une expérience inestimable. Votre engagement, votre collaboration et votre soutien ont été des atouts précieux tout au long de notre parcours commun. Merci pour votre amitié et votre dévouement.

Avec toute ma gratitude et mon amour.

M. Khouloud

Dédicace

Avec tous mes sentiments de respect, Merci Allah de m'avoir donné la capacité d'écrire et de réfléchir, la force et la patience d'aller jusqu'au bout du rêve. A mon paradis, a la prunelle de mes yeux, à la source de ma joie et mon bonheur.ma

lune et le fil d'espoir qui allumer mon chemin, ma moitié,

Maman « Fatima ».

A celui qui m'a fait une femme, ma source de vie, d'amour et d'affection à mon support qui était toujours à mes côtés pour me soutenir et m'encourage, à mon prince

Papa « Lakhdar ».

A ma chère tante « Khawla » qui a résisté à un long programme d'étude

*A mes frères et ma sœur.
Et à toute ma famille NEGADI*

*A ma chère amie et binôme « KHOULOUD MAHREZ » Je vous remercie pour votre
amitié et votre loyauté.*

A Mes encadreurs (Mr. Abdelkader GHEZOUANI, Mme. Imene BOUSMAHA)

Je dédie ce travail

Avec toute ma gratitude et mon amour.

N.Feryal

Résumé

Ce mémoire de fin d'études explore la gestion énergétique et le contrôle d'un véhicule électrique intégrant des sources d'énergie hybrides. Face aux défis environnementaux croissants liés à la prolifération des véhicules à moteur thermique, l'industrie automobile se tourne vers les véhicules électriques (VE) comme solution prometteuse. Les VEs, bénéficiant de l'absence d'émissions de CO₂, d'un fonctionnement silencieux et d'une fiabilité accrue, sont soutenus par des initiatives gouvernementales et des investissements massifs des constructeurs automobiles. Ce projet de fin d'étude se concentre sur l'intégration de batteries, supercondensateurs et piles à combustible pour améliorer l'autonomie et la durée de vie des VEs, nécessitant une gestion précise et intelligente des sources d'énergie hybrides. Le projet est basé sur la stratégie de contrôle de la gestion d'énergie PI Classique, qui se caractérise par sa facilité de construction et de modification, sa courte durée de mise en œuvre et ses meilleurs résultats. La gestion d'énergie d'un système électrique consiste à contrôler les flux énergétiques des différentes sources constituant le système. Elle permet de satisfaire les demandes en puissance de la charge et augmenter la durée de vie du système tout en respectant différentes contraintes de fonctionnement comme la puissance limitée des sources, les états de charge des éléments de stockage... etc.

Mots-clés :

Véhicules électriques (VEs), Piles à combustible, Batteries, Supercondensateurs, Gestion d'énergie, PI classique.

ملخص

تتناول هذه المذكرة إدارة الطاقة والتحكم في مركبة كهربائية تدمج مصادر طاقة هجينة. في مواجهة التحديات البيئية المتزايدة كحل واعد. تستفيد (VE) المرتبطة بانتشار المركبات ذات المحركات الحرارية، تتجه صناعة السيارات نحو المركبات الكهربائية المركبات الكهربائية من عدم انبعاثات ثاني أكسيد الكربون، التشغيل الصامت، والموثوقية العالية، وتحظى بدعم المبادرات الحكومية والاستثمارات الضخمة من شركات تصنيع السيارات. يركز هذا المشروع على دمج البطاريات، المكثفات الفائقة، وخلايا الهيدروجان لتحسين مدى الحياة ومدة التشغيل للمركبات الكهربائية، مما يتطلب إدارة دقيقة وذكية لمصادر الطاقة الهجينة. يعتمد الكلاسيكية التي تتميز بسهولة البناء وسهولة التعديل، وقصر زمن التنفيذ، PI المشروع على استراتيجية التحكم في إدارة الطاقة وتحقيق نتائج أفضل. تتعلق إدارة الطاقة في النظام الكهربائي بالتحكم في التدفقات الطاقية لمختلف المصادر التي يتكون منها النظام. وهي تهدف إلى تلبية متطلبات الطاقة للحمل وزيادة عمر النظام مع الامتثال للقيود التشغيلية المختلفة مثل القدرة المحدودة للمصادر، وحالات شحن عناصر التخزين... إلخ

الكلمات الرئيسية : المركبات الكهربائية، خلايا الوقود، البطاريات، المكثفات الفائقة، إدارة الطاقة، تحكم كلاسيكي

Abstract

This document focuses on the energy management and control of an electric vehicle integrating hybrid energy sources. Faced with the growing environmental challenges posed by the proliferation of internal combustion engine vehicles, the automotive industry is turning to electric vehicles (EVs) as a promising solution. EVs, which benefit from zero CO₂ emissions, silent operation and greater reliability, are being supported by government initiatives and massive investment by carmakers. This final project focuses on the integration of batteries, supercapacitors and fuel cells to improve the range and lifespan of EVs, requiring precise and intelligent management of hybrid energy sources. Based on the PI Classic energy management control strategy, which is simple to build. What's more, it's easy to set up, has a short runtime and delivers better results. Energy management of an electrical system consists of controlling the energy flows from the various sources making up the system. It makes it possible to satisfy the power demands of the load and increase the lifetime of the system while complying with various operating constraints such as the limited power of the sources, the states of charge of the storage elements... etc.

Key-words:

Electric vehicles (EVs), Fuel cells, Batteries, Supercapacitors, Energy management, Conventional PI.

Table des figures

Chapitre 01

| | |
|--|----|
| Figure 1.1 : Première voiture électrique (a), Véhicule électrique de Thomas Parker (b)..... | 20 |
| Figure 1.2 : BLUE CAR, voiture électrique (a), Voiture de Tesla (b)..... | 21 |
| Figure 1.3 : Chaîne de traction du véhicule tout électrique..... | 23 |
| Figure 1.4 : Bornes de recharges des véhicules tout électriques..... | 26 |
| Figure 1.5 : Station de rechargement en Algérie (a), Borne de recharge en Algérie..... | 27 |
| Figure 1.6 : Types de prise de recharge des véhicules électriques..... | 28 |

Chapitre 02

| | |
|---|----|
| Figure 2.1 : Schéma de principe d'une pile à combustible de type PEMFC..... | 33 |
| Figure 2.2 : Principe de fonctionnement des batteries..... | 36 |
| Figure 2.3 : Emplacement des batteries par rapport la densité d'énergie massique..... | 37 |
| Figure 2.4 : Supercondensateurs (a) Représentation schématique d'un Supercondensateur dans l'état chargé et déchargé (b)..... | 38 |
| Figure 2.5 : Angles de braquage - Condition d'Ackermann..... | 42 |
| Figure 2.6 : Forces sur le véhicule Forces sur le véhicule..... | 43 |
| Figure 2.7 : Volkswagen e-UP..... | 46 |
| Figure 2.8 : Graphiques des profils de conduite HWFET, UDDS, US06 et NEDC..... | 47 |
| Figure 2.9 : Puissance du moteur vs temps d'accélération et vs vitesse constante..... | 51 |
| Figure 2.10 : Graphiques de puissance et d'énergie pour les profils de conduite US6, urbaine (UDDS) et d'auto route (HWFET)..... | 52 |
| Figure 2.11 : Courbes de polarisation de la pile PEMFC..... | 53 |
| Figure 2.12 : Courbes de polarisation du batterie. (a) Caractéristiques de décharge du courant nominal. (b) Courant de décharge..... | 55 |
| Figure 2.13 : Topologies et Configurations des systèmes..... | 58 |
| Figure 2.14 : Schéma électrique d'un onduleur de tension triphasé..... | 60 |
| Figure 2.15 : Structure of DC/DC converters. (a) Boost converter. (b) Buck-boost converter..... | 61 |

Chapitre 03

| | |
|---|----|
| Figure 3.1 : Schéma de la structure générale du contrôle direct du couple (DTC Classique)..... | 66 |
| Figure 3.2 : Evolution du vecteur flux pendant une période T_e | 67 |
| Figure 3.3 : Position des vecteurs flux statorique φ_s et rotorique φ_r | 68 |

| | |
|---|-----|
| Figure 3.4: Exemple de l'évolution de l'angle ζ | 69 |
| Figure 3.5: Choix du vecteur tension | 70 |
| Figure 3.6: Sélection des tensions correspondant au contrôle du flux (a), Contrôleur à hystérésis à deux niveaux (b)..... | 73 |
| Figure 3.7: Correcteur à hystérésis du couple: (a) à deux niveaux, (b) à Trois niveaux..... | 74 |
| Figure 3.8: Schéma bloc de régulation de vitesse..... | 75 |
| Figure 3.9: Résultats de simulation de la DTC à vide..... | 79 |
| Figure 3.10: Résultats de simulation de la DTC lors du démarrage à vide suivi d'une application d'un couple de charge..... | 81 |
| Figure 3.11: Résultats de simulation de la DTC lors de l'inversion de sens de rotation..... | 83 |
| Figure 3.12: Résultats de simulation de la DTC à changement de la vitesse..... | 84 |
| Figure 3.13: Représentation de la variation de la résistance statorique..... | 86 |
| <u>Chapitre 04</u> | |
| Figure 4.1: Organigramme de la gestion de l'énergie..... | 89 |
| Figure 4.2: Stratégie de contrôle énergétique global pour le système d'alimentation hybride..... | 91 |
| Figure 4.3: Profil de vitesse et puissance électrique (Cycle Test 80s)..... | 93 |
| Figure 4.4: Angle de braquage | 93 |
| Figure 4.5: Vitesse linéaire du véhicule électrique 2WD (a), Erreur de vitesse (b) | 95 |
| Figure 4.6: Vitesse linéaire des roues arrière du véhicule électrique 2WD..... | 96 |
| Figure 4.7: Réponse de couple électromagnétique développé par les moteurs arrière | 97 |
| Figure 4.8: Allure de courant statorique appelé par les moteurs arrière M1 et M2..... | 98 |
| Figure 4.9 : Trajectoire de flux statorique dans le plan ($\alpha - \beta$) des moteurs M1 et M2..... | 98 |
| Figure 4.10: Force de traction développée par les moteurs arrière du véhicule..... | 99 |
| Figure 4.11 : Evolution des couples résistants du véhicule..... | 100 |
| Figure 4.12 : Répartition des puissances durant le Test 80s cycle..... | 101 |
| Figure 4.13: Tension (a) et courant développé (b) par la PàC durant le Test 80s cycle..... | 102 |
| Figure 4.14: Tension du bus CC pour un profil de conduite de 80 secondes..... | 102 |
| Figure 4.15: SOC de la batterie (a) et du supercondensateur (b) sous Test 80s cycle..... | 103 |
| Figure 4.16: Consommation de l'hydrogène H_2 de la pile à combustible pour un profil de conduite de 80 secondes..... | 104 |
| Figure 4.17: Variation de la distance parcourue par le véhicule électrique 2WD | 104 |
| Figure 4.18: Tension (a) et courant développé (b) par la SC durant le Test 80s cycle..... | 105 |

Liste des tableaux

| | |
|--|-----|
| Tableau 2.1 : Caractéristiques des différentes technologies de piles à combustibles..... | 34 |
| Tableau 2.2 : Caractéristiques des différentes batteries pour une application VE..... | 37 |
| Tableau 2.3 : Comparaison des motopropulseurs utilisés en traction électrique..... | 40 |
| Tableau 2.4 : Caractéristiques techniques de la Volkswagen e-UP..... | 46 |
| Tableau 2.5 : Paramètres du modèle mécanique du véhicule..... | 47 |
| Tableau 2.6 : Principales caractéristiques des différents cycles de conduite..... | 47 |
| Tableau 2.7 : Paramètres de la pile à combustible..... | 52 |
| Tableau 2.8 : Spécifications de la batterie au Lithium-ion de 24V (100Ah et 2.6Wh) (Lithium fer phosphate (LiFePo4))..... | 54 |
| Tableau 2.9 : Caractéristiques du système de batteries Lithium-ion de 24V (100Ah et 2.6Wh) (Lithium fer phosphate (LiFePo4))..... | 55 |
| Tableau 2.10 : Spécifications du supercondensateur (Modules de 48V de NESSCAP) | 56 |
| Tableau 2.11 : Caractéristiques du système de SC (Modules NESSCAP de 48V)..... | 57 |
| Tableau 2.12 : Avantages et inconvénients des configurations..... | 59 |
| Tableau 2.13 : Paramètres du convertisseur Boost..... | 62 |
| Tableau 2.14 : Paramètres du convertisseur Buck-Boost..... | 63 |
| Tableau 3.1 : Position du vecteur flux statorique..... | 72 |
| Tableau 3.2 : Table de commutation de la commande DTC..... | 75 |
| Tableau 4.1 : Différentes phases de profil de vitesse par le cycle de conduite proposé..... | 93 |
| Tableau 4.2 : Différentes phases de puissance électrique par le cycle de vitesse proposé..... | 94 |
| Tableau 4.3 : Performances de la réponse de vitesse..... | 94 |
| Tableau 4.4 : Valeur de vitesse des roues motrices pour les deux virages (km/h)..... | 95 |
| Tableau 4.5 : Valeur de couple électromagnétique de chaque moteur..... | 97 |
| Tableau 4.6 : Variation de courant statorique de chaque moteur durant le cycle de conduite... | 98 |
| Tableau 4.7 : Variation des couples résistants au roulement du VE2WD..... | 100 |
| Tableau 4.8 : Variation de la distance parcourue par le véhicule..... | 105 |
| Tableau 4.9 : Tableau comparatif de la consommation d'hydrogène avec la stratégie PI et des profils de conduite différents | 106 |

Abréviations

Indices

a, b, c : Axes du repère triphasé

α, β : Axes du repère diphasé lié au stator

Variables principales

V_{sa}, V_{sb}, V_{sc} : Tensions statoriques

i_{sa}, i_{sb}, i_{sc} : Courants statoriques

$\varphi_{sa}, \varphi_{sb}, \varphi_{sc}$: Flux statorique

Paramètres

R_s, R_r : Résistance statorique et rotorique

M : Inductance mutuelle cyclique entre stator et rotor.

L_s, L_r : Inductance statorique et rotorique

V_{dc} : Tension continu à l'entrée de l'onduleur

g : Accélération gravitationnelle

M_v : Masse du véhicule

J_m : Moment d'inertie du véhicule

R_ω : Rayon de la roue

S_f : Section frontal du véhicule

ρ_{air} : densité volumique de l'air

C_{px} : Coefficient de pénétration dans l'air

C_{rr} : Coefficient de résistance au roulement

T_L : Couple de charge

Acronymes

VTE : Véhicules tout électriques

VE : Véhicule électrique

MAS : Machine Asynchrone

MCC : Moteur à Courant Continu

MSAP : Moteur Synchrone à Aimants Permanents

MRV : Reluctance Variable

PI : Correcteur Proportionnel Intégral

DTC : Direct Torque Control (commande directe du couple)

DSC : Direct Self Control

FOC : Commande Vectorielle à Flux rotorique orientée

Li-ion : Lithium ion

Ni-Cd : Nickel-Cadmium

Ni-MH : Nickel-Metal Hydride

ES : Energy Sources (sources d'énergie)

SC : Supercondensateur

DC : Direct current (courant continue)

AC : Alternatif current (corant alternatif)

PAC : Pile à Combustible

PEM : Membrane Échangeuse de Protons

PEMFC : Proton Exchange Membrane Fuell Cells

SOC: Etat de Charge d'une batterie (State of Charge)

DOD : Depth of Discharge (Profondeur de décharge)

EV2WD : Electric Vehicle with F Wheel Drive (véhicule électrique à quatre roues motrices)

2WD: Two wheels drive (Deux Roues Motrices)

UDDS: Cycle de conduite urbaine (Urban Dynamometer Driving Schedule)

NEDC: New European Driving Cycle

DWPT: Dynamic Wireless Power Transfer

HWFET: High Way Fuell Economy Test Driving Schedule

ECMS : Stratégie de minimisation de la consommation équivalente

EMS : Energy Management Systems (système de gestion d'énergie)

SGE : Strategie de gestion d'énergie

Table des matières

| | |
|---|----|
| Remerciement..... | 1 |
| Dédicace..... | 2 |
| Dédicace..... | 3 |
| Résumé..... | 4 |
| ملخص..... | 5 |
| Abstract..... | 6 |
| Table des figures..... | 7 |
| Liste des tableaux..... | 9 |
| Abréviations..... | 10 |
| Table des matières..... | 12 |
| Introduction Générale..... | 15 |
| Chapitre 01: Etat de l'art des véhicules électriques aux sources hybrides | |
| 1.1. Introduction..... | 18 |
| 1.2. Bref historique sur les véhicules électriques..... | 18 |
| 1.3. Différentes configurations des véhicules électriques..... | 21 |
| 1.3.1. Véhicules électriques hybrides..... | 21 |
| 1.3.2. Voitures tout électriques (VTE)..... | 22 |
| 1.4. Avantages et inconvénients des véhicules électriques..... | 23 |
| 1.4.1. Avantages..... | 23 |
| 1.4.2. Inconvénients..... | 24 |
| 1.5. Principe de fonctionnement d'un véhicule électrique..... | 24 |
| 1.6. Infrastructure de recharge..... | 25 |
| 1.7. Types de prises de recharge..... | 27 |
| 1.8. Technologies de recharge les plus innovantes pour les véhicules électriques en 2024..... | 28 |
| 1.9. Conclusion..... | 29 |
| Chapitre 02: Chaîne de traction et la modélisation des composants du VE à 02 roues motrices. | |
| 2.1. Introduction..... | 30 |
| 2.2. Description générale de la chaîne de traction électrique..... | 31 |
| 2.3. Composantes du véhicule électrique hybride à pile à combustible (FCHEV)..... | 32 |
| 2.3.1. Pile à combustible (PAC)..... | 32 |
| 2.3.1.1. Principe de fonctionnement..... | 32 |

| | |
|---|----|
| 2.3.1.2. Différents types de PAC..... | 33 |
| 2.3.2. Batteries..... | 35 |
| 2.3.3. Supercondensateurs..... | 38 |
| 2.4. Système de propulsion..... | 38 |
| 2.4.1. Modèle mathématique du moteur asynchrone triphasée..... | 41 |
| 2.5. Cinématique de Braquage..... | 42 |
| 2.6. Modèle dynamique du véhicule électrique..... | 43 |
| 2.6.1. Bilan des forces appliquées au véhicule électrique..... | 43 |
| 2.6.2. Choix de l'exemple du véhicule électrique..... | 45 |
| 2.7. Profils de conduite..... | 47 |
| 2.8. Dimensionnement des sources d'énergie..... | 48 |
| 2.8.1. Dimensionnement de la pile à combustible..... | 48 |
| 2.8.2. Dimensionnement de la batterie..... | 52 |
| 2.8.3. Dimensionnement du supercondensateur..... | 56 |
| 2.9. Topologies et configurations des systèmes..... | 57 |
| 2.10. Modélisation des convertisseurs électriques..... | 59 |
| 2.10.1. Onduleurs..... | 60 |
| 2.10.2. Modèles de convertisseurs DC/DC (Hacheurs)..... | 60 |
| 2.10.2.1. Limites de tension et du courant du convertisseur unidirectionnel..... | 62 |
| 2.11. Puissance totale du véhicule..... | 63 |
| 2.12. Conclusion..... | 64 |
| Chapitre 03: Commande directe du couple DTC de la machine asynchrone MAS | |
| 3.1. Introduction..... | 65 |
| 3.2. Principe de la commande direct du couple DTC..... | 65 |
| 3.2.1. Contrôle du flux statorique de la machine..... | 67 |
| 3.2.2. Contrôle de couple électromagnétique de la machine..... | 68 |
| 3.2.3. Choix du vecteur tension..... | 69 |
| 3.2.4. Les estimateurs..... | 71 |
| 3.2.4.1. Estimateurs du flux statorique..... | 71 |
| 3.2.4.2. Estimateurs du couple électromagnétique..... | 72 |
| 3.2.5. Elaboration du vecteur de commande..... | 72 |
| 3.2.5.1. Correcteur de flux..... | 72 |
| 3.2.5.2. Correcteur de couple électromagnétique..... | 73 |
| 3.2.5.2.1. Correcteur du couple à deux niveaux..... | 74 |
| 3.2.5.2.2. Correcteur du couple à trois niveaux..... | 74 |

| | |
|--|-----|
| 3.2.6. Elaboration de la table de commutation..... | 74 |
| 3.2.7. Régulation de la vitesse de la machine asynchrone..... | 75 |
| 3.2.8. Caractéristiques générales d'une DTC..... | 76 |
| 3.2.9. Avantages de la DTC..... | 76 |
| 3.2.10. Inconvénients de la DTC..... | 77 |
| 3.3. Résultats de simulation..... | 77 |
| 3.3.1. Test de démarrage à vide..... | 77 |
| 3.3.2. Test de démarrage suivi d'une application du couple de charge..... | 79 |
| 3.3.3. Test d'inversion de la vitesse..... | 81 |
| 3.3.4. Test changement de la vitesse..... | 83 |
| 3.3.5. Test de variation de la résistance statorique..... | 85 |
| 3.4. Conclusion..... | 86 |
| Chapitre 04: Résultats de simulation du véhicule électrique à deux roues motrice et la gestion d'énergie. | |
| 4.1. Introduction..... | 87 |
| 4.2. Différents stratégies de gestion d'énergie..... | 87 |
| 4.3. Stratégie de contrôle de la gestion d'énergie..... | 88 |
| 4.4. Description du système global de gestion d'énergie hybride pour VE2WD..... | 90 |
| 4.5. Profil de conduite proposée pour le véhicule électrique..... | 91 |
| 4.6. Résultats de simulation de la partie dynamique du véhicule électrique 2WD..... | 94 |
| 4.7. Résultats de simulation de la partie de la gestion d'énergie..... | 100 |
| 4.8. Conclusion..... | 107 |
| Conclusion Générale..... | 108 |
| Annexe..... | 109 |
| Bibliographie..... | 110 |

Introduction générale

L'essor des véhicules à moteur thermique représente l'une des avancées technologiques les plus marquantes de l'ère moderne. Cependant, l'industrie automobile connaît actuellement une transformation rapide face aux défis environnementaux croissants. La prolifération des automobiles traditionnelles a engendré des problèmes majeurs pour la société et l'environnement, notamment la pollution de l'air, le réchauffement climatique et l'épuisement des ressources pétrolières [1].

Depuis le début du XXe siècle, le secteur des transports est dominé par l'utilisation du pétrole, représentant plus de 21 % de l'énergie totale consommée. En 1998, la consommation de pétrole par les transports a dépassé celle de toutes les autres industries. Les projections indiquent que le nombre de véhicules dans le monde pourrait quintupler au cours des vingt prochaines années, exacerbant les problèmes environnementaux et de santé publique. Face à cette situation, des réglementations de plus en plus strictes en matière d'émissions et de consommation de carburant ont été mises en place, incitant à développer des moyens de transport plus propres, durables et économes en énergie [2].

Dans ce contexte, les technologies des véhicules électriques (VEs) apparaissent comme une solution prometteuse. Les VEs offrent de nombreux avantages, tels que l'absence d'émissions de CO₂, un fonctionnement silencieux et une fiabilité accrue. De nombreux constructeurs automobiles, soutenus par des initiatives gouvernementales, investissent massivement dans le développement de ces technologies. L'intégration de sources d'énergie hybrides, combinant batteries, supercondensateurs et piles à combustible, vise à améliorer l'autonomie et la durée de vie des véhicules électriques, la haute densité énergétique des batteries, la puissance instantanée des supercondensateurs et l'autonomie prolongée des piles à combustible. Cependant, cette complexité requiert une gestion précise et intelligente pour optimiser l'efficacité énergétique, prolonger la durée de vie des composants et assurer une performance optimale en toutes circonstances.

La mise en œuvre de ces sources d'énergie hybrides nécessite une maîtrise sophistiquée des techniques de gestion de l'énergie. Ces techniques sont cruciales pour assurer un partage optimal de la puissance en fonction des besoins du véhicule et des caractéristiques dynamiques de chaque

source. Elles doivent non seulement réguler l'utilisation des différentes sources d'énergie en fonction des conditions de conduite et des besoins du véhicule, mais aussi minimiser les pertes et maximiser la récupération d'énergie lors des phases de décélération et de freinage. Actuellement, la recherche se concentre sur le développement de stratégies de gestion de l'énergie qui soient à la fois fiables et optimales. Ces stratégies doivent garantir une performance énergétique maximale tout en minimisant les impacts environnementaux [3].

Le problème principal dans les véhicules électriques aux sources hybrides est de gérer la dépense énergétique du moteur propulseur, de déterminer les répartitions proportionnelles de la puissance pendant tout le cycle et de mettre en place des modes d'interface entre les différentes sources pour répondre aux besoins de propulsion du véhicule.

Ce mémoire vise à apporter une contribution à la problématique de la gestion de l'énergie et du contrôle d'un véhicule électrique. Ce domaine est relativement récent et comprend diverses disciplines.

L'étude présentée dans ce manuscrit est structurée en quatre chapitres :

Le premier chapitre aura pour objectif de donner quelques généralités et définitions utilisées dans le domaine du véhicule électrique. Tout d'abord, une vue d'ensemble de l'histoire du véhicule électrique. Puis, une présentation des diverses configurations des véhicules électriques. En étudiant en détail les avantages et les inconvénients de ces véhicules, en analysant également les infrastructures de recharge et les prises de recharge disponibles, et en concluant ce chapitre en exposant les technologies d'automobiles à adopter ainsi que les technologies de recharge les plus innovantes pour les véhicules électriques en 2024.

Dans **le deuxième chapitre**, nous présentons d'abord la description de la chaîne de traction du véhicule électrique et l'ensemble de composants et de systèmes qui alimentent et propulsent le véhicule électrique. Par la suite, nous exposons le modèle en mouvement du véhicule. Ensuite, une représentation mathématique de divers éléments qui composent la chaîne de traction (motorisation, convertisseur, source d'énergie) a été clairement établie. Puis, on présente en détail les différentes forces constituant le bilan des efforts appliqués au véhicule, ces efforts qui représentent le couple résistant exercé sur le véhicule et qu'il faut vaincre afin d'assurer son déplacement. Enfin, nous étudierons les profils de conduite, les topologies et configurations des systèmes.

Dans **le troisième chapitre**, nous allons présenter le principe de la commande directe du couple DTC de la machine asynchrone alimentée par un onduleur deux niveaux. Pour cette stratégie de commande, nous expliquerons le principe de réglage du flux et du couple

électromagnétique et nous présenterons des résultats de simulation montrant les avantages et les inconvénients de cette structure.

Le quatrième chapitre, est consacré à la présentation des résultats de simulation obtenus sous Matlab/Simulink du système globale du véhicule électrique en utilisant une technique de contrôle de la gestion d'énergie par un PI classique. Les performances dynamiques du véhicule et les résultats de système de gestion d'énergie seront présentés suivant un cycle de conduite test proposé.

On termine par une conclusion générale récapitulant l'ensemble des résultats obtenus lors des expérimentations.

CHAPITRE 01

Etat de l'art des véhicules électriques à sources d'énergie hybrides

1.1. Introduction

Depuis le début du XXI^e siècle, les gouvernements ont discuté du réchauffement et du changement climatique. La poursuite de l'industrialisation et la combustion intensive de combustibles fossiles ont entraîné une pollution atmosphérique importante, y compris les émissions de gaz à effet de serre des véhicules [1]. Il est crucial de substituer les sources d'énergie non renouvelables par des sources renouvelables et de mettre en place des technologies respectueuses de l'environnement dans le domaine des transports, qui représentent 49% de la consommation de pétrole [4-5]. Avec leurs caractéristiques attrayantes centrées principalement sur leur source d'énergie et leur système de propulsion, les véhicules électriques offrent des solutions potentielles pour résoudre les problèmes environnementaux liés à la circulation et constituent actuellement une alternative possible aux véhicules conventionnels [6-7].

1.2. Bref historique sur les véhicules électriques

Les véhicules électriques ont une histoire fascinante qui plonge ses racines au cœur du 19^{ème} siècle. Le premier véhicule électrique a vu le jour en 1832 grâce à l'ingéniosité de **Robert Anderson** en Écosse. Depuis cette période pionnière, les avancées technologiques dans le domaine des véhicules électriques se sont multipliées, entraînant une adoption croissante de ces moyens de transport innovants. Dans les lignes qui suivent, nous nous pencherons sur l'évolution de cette technologie révolutionnaire, ainsi que sur les avantages et les défis qui l'ont accompagnée tout au long de son parcours.

- **1832-1839**, Premier véhicule électrique inventé par **Robert Anderson** (Homme d'affaire écossais).
- **1835**, Construction d'une petite locomotive électrique par **Thomas Davenport** (américain).
- **1838**, Un modèle similaire roule jusqu'à 6 km/h par **Robert Anderson**.
- **1859**, Invention de la batterie rechargeable au plomb acide par **Gaston Planté** (Français).

- **1881**, Amélioration de la batterie rechargeable par **Camille Faure**.
- **1891**, La première vraie voiture électrique par **William Morrison** (américain)
- **1897**, Les premiers taxis électriques dans les rues de New York.
- **1899**, en Belgique, une société construite « **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.
- **Dès 1900**, Plus du tiers des voitures en circulation sont électriques, le reste étant des autos à essence et à vapeur.
- **1912**, la production des véhicules électriques est à son crête, mais, l'introduction de la **Ford Model T** à essence en 1908 va commencer à se faire sentir.
- **Années 1920**, certains facteurs mèneront au déclin de la voiture électrique. On peut citer leur faible autonomie, leur vitesse trop basse, leur manque de puissance, la disponibilité du pétrole, et leur prix deux fois plus élevé que les Ford à essence.
- **1966**, le congrès américain recommande la construction de véhicules électriques pour réduire la pollution de l'air.
- **1972**, Victor Wouk le parrain du véhicule hybride construit la première voiture hybride, la Buick Skylark de General Motors
- **1974**, la Vanguard-Sebring CitiCar, qui ressemble beaucoup à une voiturette électrique de Golf fait son apparition au Electric Véhicule Symposium de Washington, D.C. Elle peut rouler sur 64 kilomètres à une vitesse de 48 km/h.
- **1976**, le Congrès américain adopte le Electric and Hybrid Vehicle Research, Développement, and Démonstration Act.
- **1988**, le président de **GM Roger Smith** lance un fond de recherche pour développer une nouvelle voiture électrique qui deviendra la **EV1**.
- **1990**, l'Etat de la Californie vote le **Zero Emission Vehicle (ZEV)**, un plan qui prévoit que 2% des véhicules devront avoir zéro émission polluante en 1998 (puis 10% d'entre eux pour 2003).
- **Entre 1996 et 1998 GM** va produire 1117 EV1, dont 800 d'entre elles en location avec un contrat de 3 ans.
- **Toyota Motors Corporation** a présenté son premier prototype en 1996 en utilisant une base du véhicule RAV-4 LV.
- **En 1997**, Toyota lance la **Prius**, la première voiture hybride à être commercialisée en série. 18 000 exemplaires seront vendus au Japon la première année.

- 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 [8].
- A partir de 2000, la voiture électrique a été de nouveau abandonnée.



(a)



(b)

Figure 1.1 : (a) Première voiture électrique, (b) Véhicule électrique de Thomas Parker [9-10].

- En 2002, GM et DaimlerChrysler ont intenté une action en justice contre le California Air Resources Board (CARB) pour l'annulation de la loi Zero Emission Vehicle (ZEV) de 1990. En 2003, Renault essaie de produire sa voiture hybride Kangoo Electrode en France, mais elle met fin à sa production après avoir produit environ 500 voitures.
- En 2003-2004, c'est la fin de l'EV1. GM va récupérer un par un tous les véhicules pour les détruire, et ce malgré plusieurs mouvements de protestation.
- En 2007, il y avait encore 100 000 véhicules électriques en circulation aux Etats-Unis.
- En mars 2009, Vincent BOLLORE annonce la sortie pour 2010 en location mensuelle à 330 euros de la Pininfarina Blue Car [11].
- En décembre 2010, l'i-MiEV a été présenté pour la première fois en Europe. La Nissan LEAF "Leading, Environmentally Friendly, Affordable, Family Car", une voiture électrique 5 places annoncée par Nissan en 2009, a commencé sa commercialisation en Amérique au Costa Rica en février 2011 et décembre 2010. Elle est également disponible en Europe depuis fin 2011 [12].
- En 2012, le dernier concept de véhicule hybride à PAC a été présenté au salon de Genève 2012, c'est la Toyota FCV-R. La commercialisation de ce concept était prévue pour 2015.
- En 2015, le développement des véhicules électriques purs produits par des fabricants comme société Renault Zoe.

- **En 2017**, Tesla a présenté Model X équipée de milliers de cellules lithium-ion de type 18650 fournies par Panasonic, tandis que Renault Zoe a adopté un nouveau moteur fabriqué en interne ainsi qu'une nouvelle batterie qui varie de 22 à 41 kWh.
- **En 2018**, Tesla Model 3 a dominé les ventes de véhicules électriques, représentant 7% de tous les véhicules hybrides et électrifiés vendus. Les modèles chinois ont suivi de près, avec BAIC EC-Series et Nissan Leaf représentant 4 %. Tesla Model S et Model X se sont également bien déroulés, consolidant la position de Tesla avec une part de marché de 12%. [13-14].



Figure 1.2 : (a) BLUE CAR voiture électrique, (b) Voiture électrique de Tesla [13-14].

1.3. Différentes configurations des véhicules électriques

Les voitures électriques sont généralement classées selon plusieurs types, leur autonomie, leur type de propulsion voire même leur taux d'intégration d'énergies électriques. Il existe deux grandes familles de véhicules électriques :

1.3.1. Véhicules électriques hybrides

La notion de véhicule hybride est introduite lorsqu'un véhicule à moteur électrique intègre plusieurs sources d'énergie externes. L'hybridation consiste également à combiner un moteur à combustion interne avec un moteur électrique intégré à un système de batterie.

Il y'a plusieurs types des véhicules hybrides : hybride parallèle, hybride série, le Bimode (série-parallèle), hybride à dérivation de puissance, véhicule hybride rechargeable et véhicule électrique non rechargeable [15].

✚ **Véhicules hybrides série** : Il s'agit d'une configuration particulière de véhicules hybrides qui ne disposent que d'un moteur électrique pour leur propulsion. Dans ce type de configuration, le moteur à combustion interne agit uniquement comme un générateur pour produire de l'électricité qui alimente le moteur électrique ou recharge la batterie du véhicule [15].

- ✚ **Véhicules hybrides parallèles** : La particularité de leur architecture réside dans le fait que les moteurs thermique et électrique sont directement connectés à la transmission, ce qui permet à chacun d'entre eux de transmettre une puissance mécanique aux roues de manière parallèle [16].
- ✚ **Véhicules hybrides bimode (série-parallèle)** : combine les modes de fonctionnement série et parallèle pour optimiser les performances et l'efficacité énergétique selon les conditions de conduite [16].
- ✚ **Véhicules hybrides à dérivation de puissance** : également connu sous le nom de « véhicules hybrides à engrenages planétaires », est une configuration avancée de véhicules hybrides qui utilisent un système de transmission complexe pour combiner efficacement la puissance du moteur électrique et du moteur à combustion interne.
- ✚ **Véhicules hybrides rechargeables** : aussi connu sous le nom d'hybride rechargeable (PHEV - Plug-in Hybrid Electric Vehicle), peut-être rechargé via une source d'énergie externe, comme une borne de recharge, permettant une autonomie électrique plus importante.

1.3.2. Véhicules tout électriques (VTE)

La propulsion d'un véhicule électrique repose entièrement sur un moteur fonctionnant à l'électricité, assurant ainsi la transmission de la force motrice aux roues par le biais d'un ou de plusieurs moteurs électriques, en fonction de la configuration de transmission adoptée (voir figure 1.3).

Grâce aux avancées scientifiques et technologiques dans le domaine de l'électronique de puissance, de nouveaux concepts de gestion de l'énergie sont explorés pour perfectionner ce mode de propulsion. Ces explorations convergent vers une problématique commune : la production, le stockage et l'utilisation de l'électricité. Il s'agit d'un véhicule équipé uniquement d'un accumulateur comme source d'énergie. Les véhicules entièrement électriques actuellement proposés sont principalement conçus pour un usage urbain, offrant une autonomie variante entre 40 et 100 km, grâce à l'utilisation de technologies de batteries relativement conventionnelles [17].

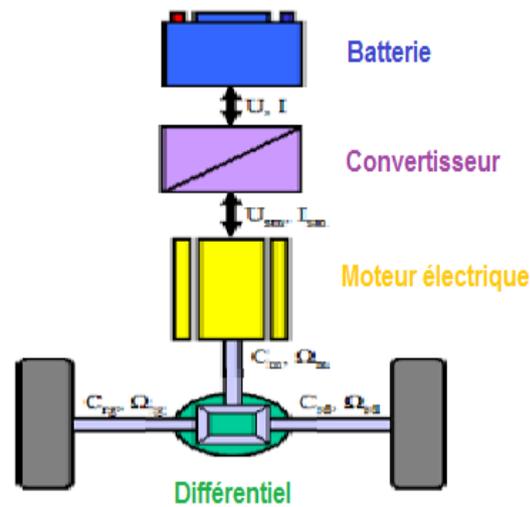


Figure 1.3 : Chaîne de traction du véhicule tout électrique.

Il existe quatre catégories principales de véhicules tout électriques :

- **Véhicules électriques à hydrogène (VEPC)** : utilisent un système de pile à combustible pour produire de l'électricité à partir de l'hydrogène, offrant une autonomie plus longue et des émissions réduites.
- **Véhicules électriques à batterie (VEB)** : Il s'agit d'un véhicule électrique qui utilise des batteries rechargeables pour stocker et générer de l'énergie électrique.
- **Véhicules électriques auto-conduit** : souvent désignés sous le nom de véhicules électriques autonomes (VEA), représentent l'avenir prometteur de la mobilité. Ces véhicules utilisent un système de conduite autonome et sont équipés de capteurs, de caméras, de lidars et d'autres technologies avancées pour percevoir leur environnement et prendre des décisions de conduite sans intervention humaine directe.
- **Véhicules électriques aux énergies renouvelables** : sont des véhicules qui utilisent de l'énergie électrique produite à partir d'énergies renouvelables pour fonctionner.

1.4. Avantages et inconvénients des véhicules électriques

1.4.1. Avantages

- **L'impact environnemental** : Le VE n'émet aucun gaz à effet de serre, ne rejette aucun hydrocarbure et aucune fumée [18,19].

- **Le silence et le confort de conduite** : C'est assez surprenant de n'entendre qu'un simple « souffle », la voiture est quasi silencieuse. Un véritable atout pour la quiétude des villes.

- **Économique** : Le véhicule électrique est aussi économique, elle ne consomme pas d'énergie durant les phases de ralenti parce que les batteries ont la capacité de se recharger pendant ces phases (de ralenti). Et aussi en matière de coût, l'électricité revient beaucoup moins chère que l'hydrocarbure [19].

- **Entretien réduit** : La voiture électrique demande peu d'entretiens, aucune vidange ou changement de filtre à réaliser. Le système moteur est très simplifié par rapport à un véhicule thermique (essence, diesel ou gaz), avec moins de pièces qui rentrent en rotation.

- **Performances** : Le moteur électrique est beaucoup plus performant et offre un rendement nettement meilleur que le moteur thermique, environ 80% pour l'électrique contre 20 à 30% pour le moteur thermique. Cela veut dire que la voiture électrique met à profit 80% de l'énergie qu'elle utilise [18,19].

1.4.2. Inconvénients

Bien que le véhicule électrique présente de nombreux avantages, certains désavantages entravent actuellement son développement [18, 20].

- **Autonomie** : Les batteries ont une autonomie limitée, une moyenne de 150 km, ce qui est peu si on les compare à une voiture thermique pour certains modèles tel que Peugeot 508 BlueHDi 130.

- **Temps de recharge et la disponibilité des bornes** : Le temps de recharge d'un VE est variable, il dépend de la puissance disponible au point de recharge. Aujourd'hui, il faut compter environ 8 h pour faire une recharge sur une prise domestique. Quant aux bornes de recharge, elles ne sont pas toutes normalisées à l'échelle européenne.

- **Coût d'achat** : Le VE reste plus cher à l'achat qu'un véhicule thermique à cause du coût élevé des packs de batteries.

- **Silence** : C'est un avantage pour l'utilisateur mais pas forcément pour certains usagers de la route, comme les mal voyants, mal entendant, qui ne pourront plus entendre l'arrivée du véhicule, ce qui a déjà provoqué des accidents.

1.5. Principe de fonctionnement d'un véhicule électrique

Les voitures électriques dépendent entièrement de l'énergie électrique pour leur fonctionnement, et leur propulsion est assurée par un système complexe où les commandes de l'accélérateur sont converties en action du moteur électrique, permettant ainsi de réguler la vitesse et le mouvement du véhicule. Les véhicules électriques sont principalement alimentés par l'énergie électrique, stockée dans des batteries spéciales ou à l'aide d'un générateur de tension comme un supercondensateur ou une pile à combustible. En général, un véhicule électrique est constitué de trois principales unités : une unité d'alimentation, une unité de motorisation et une unité de commande, pour mettre en mouvement un véhicule électrique, l'action sur la pédale d'accélérateur, équipée d'un potentiomètre, envoie un signal au contrôleur. Ce dernier détermine alors la quantité d'énergie que la source d'alimentation

doit fournir au moteur pour atteindre la vitesse de rotation souhaitée, tout en entraînant les pneus liés au moteur à une vitesse adaptée, généralement grâce à un réducteur [21,22].

1.6. Infrastructure de recharge

L'infrastructure de recharge pour les véhicules électriques est un élément essentiel de l'écosystème de la mobilité électrique. Elle se compose de différentes installations et équipements permettant aux conducteurs de recharger les batteries de leur véhicules électriques. Voici quelques éléments-clés de cette infrastructure :

✚ **Bornes de recharge publiques** : Ces bornes sont installées dans des lieux publics tels que les parkings, les stations-service, les centres commerciaux, les hôtels, etc. Elles offrent aux conducteurs la possibilité de recharger leur véhicule lorsqu'ils sont en déplacement.

✚ **Bornes de recharge domestiques** : Ces bornes sont installées à domicile ou sur le lieu de travail. Elles permettent aux propriétaires de véhicules électriques de recharger leur véhicule pendant la nuit ou pendant la journée, ce qui leur offre une grande commodité et une autonomie suffisante pour leurs trajets quotidiens.

✚ **Réseaux de recharge rapide** : Ces réseaux sont composés de bornes de recharge ultra-rapides qui peuvent recharger les batteries des véhicules électriques en quelques minutes seulement. Ils sont souvent situés le long des autoroutes et des routes principales pour permettre aux conducteurs de réaliser des trajets longue distance sans avoir à attendre longtemps pour recharger leur véhicule.

✚ **Applications et plateformes de gestion des recharges** : Ces applications et plateformes en ligne permettent aux conducteurs de localiser les bornes de recharge disponibles, de planifier leurs trajets en fonction des points de recharge, de vérifier l'état des bornes et parfois même de payer pour l'utilisation des bornes.

✚ **Intégration avec les énergies renouvelables** : De plus en plus, l'infrastructure de recharge pour les véhicules électriques est intégrée avec des sources d'énergie renouvelable telles que l'énergie solaire et éolienne, ce qui permet de réduire l'empreinte carbone globale de la mobilité électrique. L'expansion des véhicules électriques exige le déploiement d'un réseau de bornes de recharge à travers le pays, tant dans les domaines privés que publics.

Les infrastructures de recharge jouent un rôle crucial dans le développement de l'électromobilité. Trois types de recharge sont disponibles :

- **Charge normale** : La charge normale, également connue sous le nom de charge lente ou charge standard, est la méthode de recharge la plus courante pour les véhicules électriques. Elle consiste à recharger la batterie à un rythme relativement lent en utilisant une source d'électricité standard, comme une prise électrique domestique ou une borne de recharge

publique. La charge normale est généralement utilisée lorsque le véhicule est stationné pendant une période prolongée, par exemple pendant la nuit à domicile ou pendant la journée au travail. Ce type de charge est idéal pour recharger complètement la batterie lorsque le véhicule n'est pas utilisé pendant une longue période, comme pendant la nuit.

- **Charge accélérée** : La charge accélérée est une méthode de recharge intermédiaire entre la charge standard et la charge rapide pour les véhicules électriques. Elle permet de recharger les batteries à un rythme plus rapide que la charge standard, mais moins rapide que la charge rapide. Cette méthode de recharge utilise des bornes de recharge équipées de systèmes de charge plus puissants que les bornes de recharge standard, mais moins puissants que ceux utilisés pour la charge rapide. La charge accélérée est souvent utilisée dans des contextes tels que les stations de recharge publiques, les stations-service, les centres commerciaux et les parkings, où les conducteurs peuvent avoir besoin de recharger leur véhicule plus rapidement que la charge standard, mais n'ont pas besoin de la rapidité de la charge rapide.
- **Charge rapide** : est une technologie de recharge pour les véhicules électriques qui permet de recharger rapidement les batteries en un temps relativement court (voir figure 1.4). Les véhicules équipés par les deux derniers types de recharge sont dotés de batteries et d'équipements spécialement adaptés à ces modes de charge.



Figure 1.4 : Bornes de recharges des véhicules tout électriques.

Le groupe SoneLgaz a entrepris l'installation de plusieurs bornes de recharge pour les véhicules électriques dans quatre (4) wilayas, principalement sur l'autoroute Est-Ouest. Ces bornes, qui sont actuellement en dernière phase d'installation, se trouvent dans la promenade des Sablettes (Alger), les stations-services de Babor (Sétif), Tamesguida et Sidi El Kebir (Blida) et Baba Ali (Mascara) (figure 1.5).

En collaboration avec Naftal, Sonelgaz mettra en place des projets pilotes visant à installer 1000 bornes de recharge pour les véhicules électriques dès le début de l'année 2024 [23].



(a)



(b)

Figure 1.5 : (a) Station de rechargement en Algérie, (b) Borne de recharge en Algérie. [23- 24]

1.7. Types de prise de recharge

Les bornes de recharge pour véhicules électriques sont classées en deux catégories : les bornes en courant alternatif (AC) et les bornes en courant continu (DC) (figure 1.6).

- **Prise Combo CCS (Combined Charging System)** : signifie système de recharge combiné. C'est une nouvelle norme européenne qui permet des recharges rapides sur des bornes à courant continu et alternatif, d'où son appellation "Combo" qui signifie qu'on peut y brancher deux types de prises. Elle a été développée par un consortium de 7 constructeurs automobiles (Audi, BMW, Daimler, Ford, GM, Porsche, Volkswagen) pour concurrencer la prise CHAdeMO.
- **Prise CHAdeMO** : est une prise standard de recharge rapide en courant continu pour les véhicules électriques, développé par un consortium de constructeurs automobiles japonais en 2010.
- **Prise de type 2** : est le standard européen pour la recharge des véhicules électriques en courant alternatif. Développée en 2009 par le fabricant allemand Mennekes, elle s'est imposée comme la norme en Europe depuis 2013 grâce à son adoption par la Commission européenne.
- **Prise de Type 1** : est un connecteur utilisé pour recharger les véhicules électriques, offrant une recharge lente à semi-accélérée jusqu'à 7,4 kW en courant alternatif monophasé. On la retrouve principalement sur les véhicules électriques de première génération d'Asie, des États-Unis ou d'Europe. Cette prise ne permet pas de recharge rapide comme la prise CHAdeMO, et elle ne dispose pas d'un système de verrouillage pour empêcher le débranchement du câble [25].

| | Stations de recharge normale (AC) | | Stations de recharge rapide (DC) | |
|---------------------|---|---|---|--|
| Prise de recharge | Type 1  | Type 2  | CHAdeMO  | CCS  |
| Informations | surtout installée dans les véhicules asiatiques | installée de manière standard dans la quasi-totalité des véhicules neufs | surtout installée dans les véhicules asiatiques | Prise standard de type 2 étendue |
| Mode de charge | Courant alternatif (AC) | Courant alternatif (AC) | Courant continu (DC) | Courant continu (DC) |
| Puissance de charge | 3,7 – 7,2 kW | 3,7 – 22 kW | 50 – 300+ kW | 50 – 300+ kW |
| Durée de charge | 1 – 8 heures | 1 – 8 heures | 20 – 60 min | 20 – 60 min |

Figure 1.6 : Types de prise de recharge des véhicules électriques.

1.8. Technologies de recharge les plus innovantes pour les véhicules électriques en 2024

Parmi les technologies de recharge les plus innovantes pour les véhicules électriques en 2024 :

- ✚ **Recharge sans fil par induction** : Des entreprises comme Valeo développe des solutions de recharge sans fil par induction protégées par de nombreux brevets. Cette technologie utilise une fréquence ultra basse de 3 kHz et pourrait être installée dans les rues, les parkings ou directement chez les utilisateurs. Cependant, la vitesse de recharge reste encore un défi à surmonter.
- ✚ **Recharge dynamique sans fil (DWPT)** : Récemment, Chrysler a présenté un concept de véhicule capable de se recharger en roulant grâce à la technologie "Dynamic Wireless Power Transfer" (DWPT). Bien que prometteuse, cette technologie n'est pas encore prête pour une adoption massive en raison des coûts élevés liés au développement des infrastructures.
- ✚ **Batteries à électrolyte solide** : Des entreprises comme QuantumScape travaillent sur le développement de batteries lithium-ion à électrolyte solide. Ces batteries offrent une densité énergétique supérieure, une meilleure sécurité et une durée de vie plus longue que les batteries lithium-ion traditionnelles. Elles devraient permettre d'atteindre des autonomies records pour les véhicules électriques.
- ✚ **Systèmes de gestion intelligente de la recharge** : L'intelligence artificielle joue un rôle crucial pour optimiser l'efficacité énergétique des véhicules électriques en analysant les données de consommation et de recharge. Cela permet d'améliorer les performances des batteries et de gérer plus efficacement les infrastructures de recharge.

1.9. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons suivi un parcours qui nous a donné une compréhension des bases et des défis des véhicules électriques. En donnant un bref aperçu historique, nous avons exposé l'évolution de cette technologie, depuis ses débuts modestes jusqu'à son apparition comme une force majeure dans l'industrie automobile moderne. À travers l'examen des différentes configurations des véhicules électriques, nous avons exploré les multiples voies empruntées par les constructeurs pour répondre aux besoins variés des consommateurs et aux défis de la durabilité. En détaillant les avantages et les inconvénients de ces véhicules, nous avons dressé un tableau équilibré de leurs implications, mettant en évidence leurs points forts tout en reconnaissant les défis à relever. Cette analyse critique nous a permis de mieux appréhender les implications environnementales, économiques et sociales de l'adoption généralisée des véhicules électriques. Aussi, en examinant les infrastructures de recharge et les prises de recharge disponibles, nous avons souligné l'importance croissante de développer des réseaux de recharge efficaces et accessibles pour accompagner la croissance rapide du parc de véhicules électriques. Ces infrastructures sont essentielles pour garantir la commodité et la fiabilité de l'utilisation quotidienne des véhicules électriques, tout en contribuant à réduire les obstacles à leur adoption généralisée. Enfin, nous concluons ce chapitre par une présentation des technologies de recharge les plus innovantes pour les véhicules électriques en 2024.

CHAPITRE 02

Modélisation des composants du véhicule électrique à deux roues motrices (2WDEV)

2.1. Introduction

La conception et l'ingénierie des véhicules électriques représentent un domaine en pleine évolution, au croisement de la technologie, de la mobilité durable et de l'innovation énergétique. Au cœur de cette révolution se trouve la chaîne de traction, un ensemble complexe de composants et de systèmes qui alimentent et propulsent le véhicule électrique. Pour comprendre en profondeur les enjeux et les opportunités de cette transformation, il est essentiel d'explorer les différents aspects qui composent la chaîne de traction.

Dans ce chapitre, nous plongerons dans la description de la chaîne de traction, en examinant ses composants essentiels et leurs interactions. Nous commencerons par une exploration des sources d'énergie (pile à combustible, batteries et supercondensateurs) pour alimenter les véhicules électriques. Ensuite, nous nous pencherons sur le système de propulsion lui-même, en détaillant les principes et les technologies qui permettent de convertir l'énergie électrique en mouvement.

Nous aborderons également la modélisation des sources d'énergie, un aspect crucial de la conception et de l'optimisation des véhicules électriques, ainsi que la cinématique de braquage, qui influence la facilité d'utilisation et la conduite du véhicule. En étudiant le modèle dynamique du véhicule électrique, nous pourrions avoir une meilleure compréhension des forces et des interactions qui influencent son comportement sur la route.

Enfin, nous étudierons les profils de conduite, les topologies et configurations des systèmes, le dimensionnement des sources d'énergie, la modélisation des convertisseurs et les puissances du bus, autant d'éléments essentiels pour concevoir et optimiser efficacement la chaîne de traction d'un véhicule électrique. À travers cette exploration approfondie, nous espérons offrir un aperçu complet et éclairant de ce domaine fascinant et en constante évolution.

2.2. Description générale de la chaîne de traction électrique

La chaîne de traction d'un véhicule électrique est l'élément clé du système de propulsion qui garantit la transmission mécanique du mouvement, ce qui est crucial pour assurer le bon fonctionnement du véhicule. Elle comprend des roues, une ou plusieurs sources d'énergie, un convertisseur statique, une ou plusieurs machines électriques et un système de liaison mécanique tels qu'un réducteur de vitesse et un différentiel électronique. Voici une brève description des différentes parties :

- ✚ **Partie mécanique** : Dans cette partie, on retrouve la transmission mécanique, souvent avec un réducteur, qui relie le moteur électrique aux roues du véhicule afin de garantir la propulsion.
- ✚ **Source d'énergie** : La chaîne de traction peut être alimentée par une pile à combustible et/ou une batterie d'accumulateurs. Elle sert à fournir l'énergie électrique indispensable au fonctionnement du véhicule et peut-être à récupérer l'énergie lors du freinage.
- ✚ **Convertisseur statique** : Les onduleurs et les hacheurs sont des composants clés de la chaîne de traction, permettant de gérer les échanges d'énergie entre la source d'énergie et le groupe motopropulseur, généralement le moteur de traction. Ces dispositifs sont utilisés pour convertir et contrôler le flux d'énergie électrique, souvent en utilisant des semi-conducteurs tels que les IGBT ou les MOSFET.
- ✚ **Partie commande** : Cette partie reçoit des consignes telles que le couple demandé par l'utilisateur et la vitesse de rotation du moteur, et les utilise pour réguler le fonctionnement de la chaîne de traction.
- ✚ **Moteurs de traction** : Les moteurs utilisés dans la chaîne de traction peuvent être de différents types, tels que des moteurs synchrones à aimants permanents (MSAP), des moteurs asynchrones ou des moteurs à courant continu. Ces moteurs sont choisis pour leur fiabilité, leur rendement élevé, leur capacité à supporter des surcharges transitoires et leur puissance massique élevée, des caractéristiques essentielles pour les applications embarquées dans les véhicules électriques.

Le mode de fonctionnement de cet ensemble est extrêmement facile : Dès que le conducteur appuie sur la pédale d'accélération, une partie de l'électricité est émise de la batterie, qui sert de réserve d'énergie. Cette électricité est ensuite convertie en courant alternatif (AC) si le moteur est de type alternatif. Le moteur transmet alors un couple moteur aux roues motrices par l'intermédiaire d'un réducteur de vitesse, permettant de surmonter les différentes résistances rencontrées par le véhicule. C'est ainsi que le véhicule se met en mouvement, répondant aux sollicitations du conducteur.

2.3. Composantes du véhicule électrique hybride à pile à combustible (FCHEV)

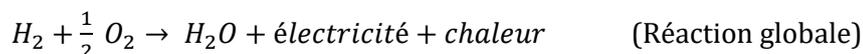
Les véhicules électriques hybrides nécessitent un ensemble de dispositifs complémentaires pour un fonctionnement optimal, notamment des batteries, des supercondensateurs (comme des sources secondaires) et des réservoirs d'hydrogène (PAC) (comme source principale).

2.3.1. Pile à combustible (PAC)

L'histoire de la pile à combustible remonte à 1839, lorsque le chercheur d'origine germanique Christian Schönbein découvrit le principe fondamental qui la sous-tend. Ce n'est que quelques années plus tard que Sir William Grove concrétisa ce principe sous la forme d'un prototype fonctionnel. Au tournant du 20^{ème} siècle, le générateur acquit peu à peu sa forme actuelle, mais ce n'est qu'avec les recherches entreprises par Francis Thomas Bacon dans les années 1930 que la pile à combustible commença à attirer à nouveau l'attention de la communauté scientifique [26,27].

2.3.1.1. Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement d'une pile à combustible repose sur une réaction électrochimique appelée oxydoréduction. Plus précisément, dans le cas d'une pile à combustible à hydrogène, l'anode reçoit de l'hydrogène et la cathode de l'oxygène. L'anode oxyde le combustible, libérant des électrons qui passent à travers un circuit externe pour produire de l'électricité, tandis que la cathode combine l'oxygène, les électrons et les ions d'hydrogène pour former de l'eau et produire de l'électricité et de la chaleur selon les équations chimiques suivantes [28] :



Ainsi, la pile à combustible convertit directement un combustible en énergie, fournissant de l'électricité, de l'eau et de la chaleur, et dans le cas de l'hydrogène, elle est considérée comme une technologie à zéro émission.

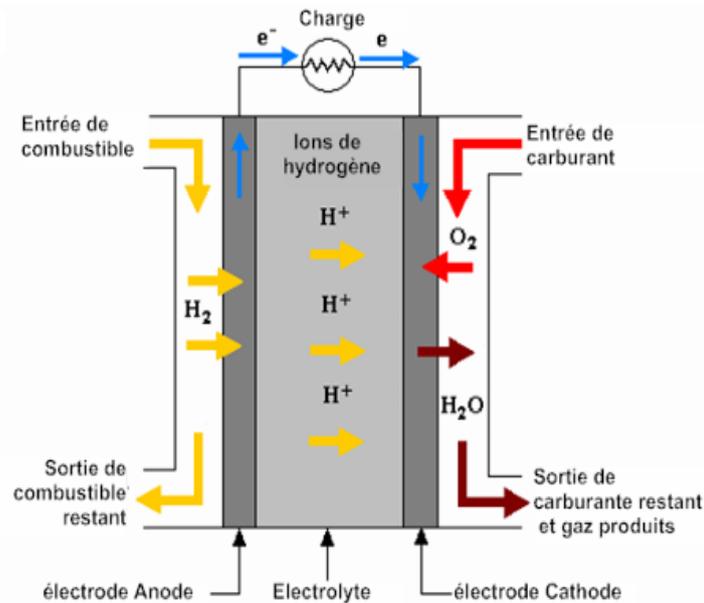


Figure 2.1 : Schéma de principe d'une pile à combustible de type PEMFC.

2.3.1.2. Différents types de PAC

Il existe actuellement six catégories principales de piles à combustible [29] (voir tableau 2.1) :

- ✚ **AFC (Alcaline Fuel Cells)** : ou piles à combustible alcalines, opèrent à des températures relativement basses, oscillant entre 65 et 90 degrés Celsius. Connu pour leur utilisation lors des missions Apollo, ces dispositifs affichent un rendement impressionnant de 50 %.
- ✚ **PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cells)** : également appelées piles à combustible à membrane échangeuse de protons, se distinguent par leur démarrage rapide et leur puissance impressionnante. Opérant à des températures relativement basses, comprises entre 20 et 100 degrés Celsius, elles sont couramment utilisées pour alimenter des véhicules et des installations de petite taille.
- ✚ **DMFC (Direct Methanol Fuel Cell)** : ou piles à combustible directe au méthanol, tirent leur énergie de l'utilisation du méthanol comme combustible. Ce dernier est introduit sur l'anode de la pile, souvent avec de l'eau. Sous l'action de la catalyse, le méthanol s'oxyde, générant des ions H^+ ainsi que du dioxyde de carbone.
- ✚ **PAFC (Phosphoric Acid Fuel Cells)** : ou piles à combustible à acide phosphorique, sont le fruit de développements technologiques récents. Capables de fonctionner à des températures allant jusqu'à 210 degrés Celsius, elles sont particulièrement adaptées à la cogénération grâce à la chaleur significative qu'elles génèrent. Ces piles sont souvent utilisées pour alimenter des infrastructures fixes disposant d'une capacité électrique de plusieurs dizaines de mégawatts.

✚ **MCFC (Molten Carbonate Fuel Cells)** : ou piles à combustible à carbonates fondus de potassium et de lithium, sont conçues pour fonctionner à des températures élevées, oscillant entre 600 et 700 degrés Celsius. Dotées d'un rendement remarquable, pouvant atteindre de 60 à 80 %, ces piles sont principalement utilisées pour alimenter de grandes installations énergétiques fixes.

✚ **SOFC (Solid Oxyde Fuel Cells)** : ou piles à combustible à oxydes solides, fonctionnent à des températures encore plus élevées que la catégorie précédente, oscillant entre 800 et 1000 degrés Celsius. Bien que leur démarrage soit lent et qu'elles nécessitent des composants capables de résister à des températures extrêmement élevées, ces piles offrent la possibilité de générer de l'électricité de manière stationnaire.

Tableau 2.1 : Caractéristiques des différentes technologies de piles à combustibles.

| Caractéristiques | Pile alcaline (AFC) | Pile à Membrane Échangeuse de proton (PEMFC) | Pile au méthanol direct (DMFC) | Pile à acide phosphorique (PAFC) | Pile à carbonate fondu (MCFC) | Pile à Oxyde solide (SOFC) |
|-------------------------------|--|--|----------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|
| Température de fonctionnement | Basse température | | | Haute température | | |
| | 50 à 250 °C | 70 à 100 °C | 70 à 90 °C | 150 à 220 °C | 600 à 800 °C | 700 à 1050 °C |
| Electrolyte | Potasse liquide (KOH) | Membrane en polymère solide | Membrane en polymère solide | Acide phosphorique liquide | Sel de carbonate fondu liquide | Céramique solide |
| Gamme de puissance | 1W à 100KW | 10mW à 1MW | 10mW à 1MW | 200KW à 10MW | 1KW à 10MW | 1KW à 10MW |
| Domaine d'application | Spatiale, défense, Équipements portatifs | Transport, stationnaire, spatiale, Équipements portatifs | Transport, équipements portatifs | Transport, stationnaire, cogénération | Stationnaire, cogénération | Stationnaire, cogénération |
| Rendement électrique | 55 - 60% | 30 - 45% | 30 - 45% | 35 - 45% 75% en cogénération | 50 - 60% | 50 - 55% 70% en cogénération |

On s'intéresse exclusivement aux piles à membrane échangeuse de protons (PEMFC). Dans le domaine du transport, cette technologie est considérée comme la meilleure alternative en raison de deux principaux avantages. Tout d'abord, elle utilise une membrane solide qui, contrairement aux électrolytes liquides, offre une meilleure stabilité de fonctionnement face aux vibrations mécaniques. Par la suite, la technologie PEM se caractérise par sa température de fonctionnement basse, ce qui facilite le démarrage rapide et diminue les temps d'attente, ce qui est particulièrement bénéfique dans les domaines du transport.

Les piles à combustible sont souvent catégorisées en fonction de leur plage de températures de fonctionnement ou du type d'électrolyte utilisé. Le choix d'une pile à combustible dépend étroitement des exigences spécifiques définies dans le cahier des charges. Dans la plupart des cas, les critères de sélection incluent [30] :

- **Température de fonctionnement** : cette dernière est directement liée au temps nécessaire pour démarrer la pile. Les piles à haute température peuvent nécessiter plusieurs dizaines de minutes pour atteindre leur température de fonctionnement optimale, tandis que les piles à basse température peuvent y parvenir en quelques minutes seulement.
- **Durée de vie** : les piles à combustible utilisant des électrolytes liquides sont souvent plus sujettes à la corrosion, ce qui peut affecter leur longévité. À l'inverse, les piles à électrolyte solide ont tendance à avoir une durée de vie plus longue.
- **Poids et dimensions** : ces contraintes sont particulièrement critiques dans les applications de transport, où la légèreté et la compacité sont des facteurs décisifs.
- **Coût** : bien que les piles à combustible offrent une technologie prometteuse pour le stockage d'énergie, elles demeurent relativement coûteuses par rapport à d'autres solutions de stockage énergétique.

La prise en compte de ces différents critères permet d'orienter le choix vers la pile à combustible la mieux adaptée à une application spécifique, en tenant compte à la fois des performances attendues, de la durabilité, et des contraintes logistiques et économiques.

2.3.2. Batteries

La batterie joue un rôle essentiel en tant que réservoir d'énergie électrique, composée de plusieurs éléments-clés, tel que l'électrode positive, également appelée cathode dans le contexte de génération d'électricité, une électrode négative, connue sous le nom d'anode dans ce même contexte, ainsi qu'un séparateur et un électrolyte. Ces composants sont immergés dans l'électrolyte, formant ainsi le cœur de l'accumulateur.

Le fonctionnement de la batterie repose sur le principe des réactions redox, impliquant deux paires distinctes, Ox1/Red1 et Ox2/Red2, qui se produisent respectivement aux électrodes positives et négatives. Ces réactions redox sont au cœur du processus de stockage et de libération d'énergie électrique dans la batterie, offrant ainsi une source d'alimentation fiable et durable pour une variété d'applications. La batterie est reliée au moteur électrique par l'intermédiaire d'un convertisseur et d'un régulateur. Lorsque la batterie est en repos, elle est alimentée par une source externe. Le choix de la batterie pour un véhicule électrique doit respecter les critères suivants [31] :

- ✚ Une bonne puissance massique (rapport puissance/poids en W/kg) qui permet des accélérations efficaces.
- ✚ Une bonne énergie massique (Wh/kg) qui signifie une bonne autonomie.
- ✚ Une tension régulière qui garantit des performances constantes.
- ✚ Une durée de vie élevée, calculée en fonction du nombre de cycles de chargement/

déchargement, réduisant les coûts pour l'utilisateur.

- ✚ L'état de la charge de la batterie (SOC), représentée par le pourcentage de la capacité maximale de la batterie qui est stocké dans la batterie à un instant déterminé.
- ✚ Capacité de la batterie (C_{batt}), à savoir la quantité de charge électrique que la batterie peut fournir avant de se décharger au complet. Elle est exprimée en ampère-heure (Ah).
- ✚ La profondeur de décharge (DOD), représentée par le pourcentage de la capacité de la batterie qui peut être déchargé de la batterie.
- ✚ Un faible coût d'entretien et un recyclage simple. [32]

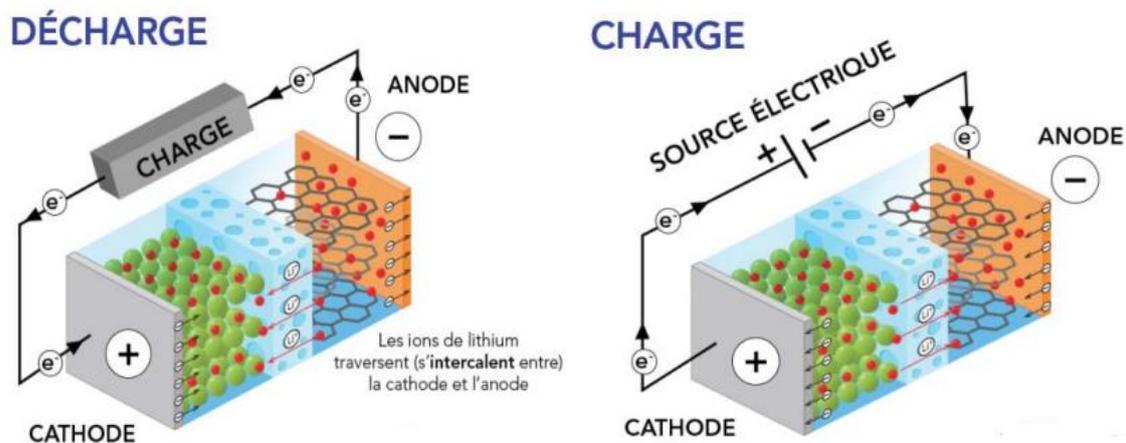


Figure 2.2 : Principe de fonctionnement des batteries.

Les batteries Lithium-ion, plomb-acide, et nickel-cadmium sont les plus couramment utilisées dans les véhicules électriques modernes, étant utilisées pour leurs performances, durabilité et la densité énergétique.

✚ Batterie Plomb-acide

La batterie au plomb, inventée en 1859, est le plus ancien accumulateur électronique, produisant 2 volts par élément. Malgré son utilisation récente dans le secteur automobile [33], elle est confrontée à des défis tels que la faible densité énergétique, la pollution potentielle et le faible recyclage.

✚ Batterie Nickel-cadmium

Les batteries nickel-cadmium (Ni-Cd) offrent une densité énergétique plus élevée que les batteries traditionnelles, mais présentent des limites telles qu'une grande sensibilité à la température, un coût élevé par kilowattheure et la toxicité du cadmium.

✚ Batterie Lithium-ion

Les batteries au lithium-ion sont très intéressantes pour le stockage de l'énergie en raison de leurs performances supérieures, de leur énergie spécifique et de leur densité énergétique.

Avec une tension de fonctionnement élevée de 3,7 volts et une masse atomique légère de 6,94 g, elles sont de plus en plus populaires dans divers secteurs tels que l'électronique portable, l'aviation, les transports terrestres et l'électronique domestique. Cependant, elles sont de plus en plus sûres par rapport aux batteries au lithium métal. Le diagramme dans la figure 2.3 et le tableau 2.2, montre les différences de puissance et d'énergie de quelques types de batteries.

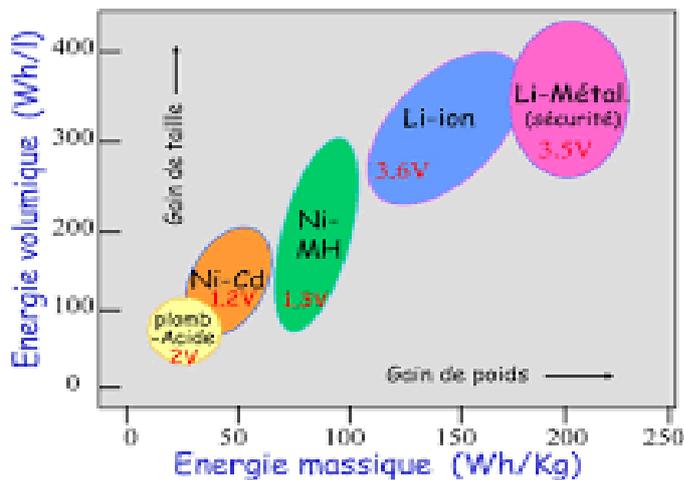


Figure 2.3 : Emplacement des batteries par rapport la densité d'énergie massique et volumique.

Tableau 2.2 : Caractéristiques des différentes batteries pour une application VE.

| Caractéristiques | Nickel Cadium | Nickel Métal hybride | Lithium-ion | Lithium-ion polymère |
|---|--------------------------------------|----------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------|
| Symbole | Ni-Cd | Ni-MH | Li-ion | Li-po |
| Densité d'énergie massique (Wh/kg) | 45-80 | 60-120 | 110-160 | 100-130 |
| Nombre de cycles | 1500 | 300 à 500 | 500 à 1000 | 200 à 300 |
| Tension nominale maximum | 1.2 V | 1.2 V | 3.6 V | 3.7 V |
| Capacité nominale maximum | 1500 Ah | 18 Ah | 4.5 Ah | 1.6 Ah |
| Mode de stockage | Déchargé | Chargé | Chargé à 40% | Chargé à 40% |
| Gamme de température | -40°C à 60°C | -20°C à 60°C | -20°C à 60°C | 0°C à 60°C |
| Avantages | Robuste, faible courant, faible cout | Peu polluant, cout modéré | Léger, puissant | Différentes formes, léger |
| Inconvénients | Toxique, effet mémoire, autodécharge | Effet mémoire, autodécharge | Cout élevé, durée de vie | Cout élevé |
| Utilisations | Jouet, outillage | Téléphones, équipements sans fil | PC portable, téléphone portable, PDA | Baladeur MP3, téléphone portable |

2.3.3. Supercondensateurs

Les supercondensateurs (SC), également connus sous le nom de supercapacités ou condensateurs à double couche, stockent de l'énergie de manière électrostatique en polarisant une solution électrolytique comme illustré à la figure 2.4. L'histoire de ce composant remonte à la découverte du phénomène capacitif par Hermann Von Helmholtz en 1853. Les premiers supercondensateurs ont été commercialisés par NEC dans les années 1970, sous le nom de supercapacitor. Grâce à leur capacité à offrir des capacités surfaciques élevées, les supercondensateurs permettent d'atteindre des valeurs très élevées de capacité, ce qui en fait des éléments de stockage d'appoint potentiel [34]. Leur structure série-parallèle, composée de plusieurs cellules et de matériaux spécifiques, leur permet d'atteindre des tensions et des courants de sortie élevés, offrant ainsi une solution de stockage d'énergie efficace et polyvalente.

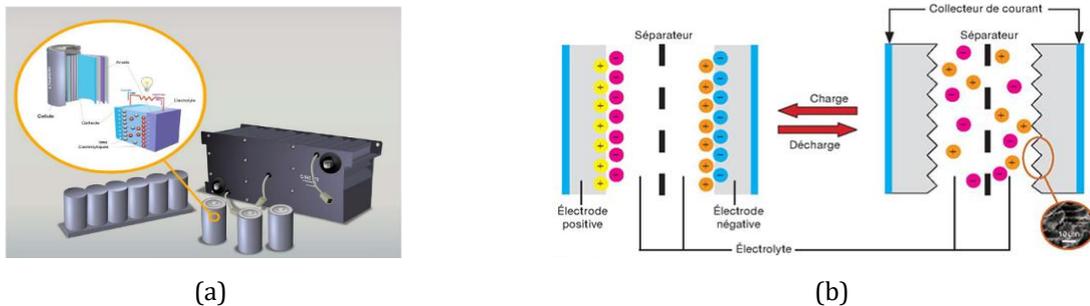


Figure 2.4 : Supercondensateurs (a), Représentation schématique d'un Supercondensateur dans l'état chargé et déchargé (b).

2.4. Système de propulsion (le moteur électrique)

Les véhicules électriques ont de meilleures performances globales que les moteurs thermiques, car ils sont plus efficaces dans la conversion de l'énergie, émettant moins d'émissions et réduisent le bruit. Ils offrent un couple élevé et peuvent s'adapter à diverses situations. Ils peuvent également recharger les batteries pendant la décélération, contrairement aux véhicules thermiques. Le choix d'un moteur électrique et de sa transmission de puissance est initialement déterminé par des caractéristiques opérationnelles essentielles telles qu'une vitesse de démarrage élevée, une vitesse maximale et une stratégie de consommation d'énergie continue [35, 36, 37]. Les fabricants des véhicules électriques emploient habituellement différents types de moteurs d'entrainements en tant qu'élément indispensable dans la chaîne de leur système de propulsion. Ceux-ci peuvent être de divers types tels que : le Moteur à Courant Continu (MCC), à Induction (MI), Synchrones à Aimant Permanent (MSAP), à Reluctance Variable (MRV).

✚ Moteur à courant continu (MCC)

Le moteur à excitation séparée, qui est utilisé dans les véhicules électriques, est l'un des nombreux types de moteurs à courant continu. Grâce à son convertisseur d'induit du type hacheur à deux interrupteurs et à son hacheur d'inducteur de plus faible puissance, c'est la solution la plus économique et la plus fiable. Cependant, cette technologie présente les inconvénients suivants [38] :

- La difficulté de refroidissement de l'induit tournant, ce qui limite la possibilité d'obtenir un couple massique élevé.
- La constitution de l'induite limite la vitesse de rotation de l'induit.
- L'usure des balais nécessite un entretien régulier pour éliminer les poussières conductrices qui nuisent à l'isolation du collecteur.
- En raison de la complexité de la machine, le coût de construction est élevé : collecteur, bobinage inductif.

✚ Moteurs synchrones (MS)

Dans cette catégorie, on trouve plusieurs sortes de configurations dont nous citons deux types les plus fréquents dans la littérature :

a. Moteur synchrone à aimants permanents (MSAP)

Il semble être une solution appropriée pour ses performances techniques, en particulier sa compacité et son efficacité. Dans ce cas, les aimants permanents créent l'excitation. Le couple total d'une machine synchrone à aimants permanents est composé d'un hybride, d'un couple de détente et d'un couple réluctant [39] :

- Les aimants en surface ne présentent aucun couple réluctant et le rotor ne présente aucune saillance. Cette machine est connue sous le nom de pôle lisse.
- Les aimants sont enterrés.
- Aimants avec une concentration de flux.

Les avantages de ces machines incluent un bon rendement et des rapports couple/masse et puissance/masse élevés. Cependant, à ce jour, le prix des aimants est élevé et ne le permet pas.

b. Moteur synchrone à réluctance variable

Le moteur synchrone à réluctance variable suscite un intérêt croissant parmi les constructeurs en raison de ses nombreuses qualités. Il s'agit d'un moteur robuste, facile à contrôler, sans balais, ce qui réduit l'usure et l'entretien, tout en offrant de bonnes performances en termes de couple maximal, de rendement et de facteur de puissance.

Cependant, pour exploiter pleinement ces performances, il est essentiel de maximiser le rapport des inductances extrêmes, ce qui rend la mise en œuvre de cette technologie assez complexe. De plus, en raison de l'absence de standardisation, le coût de cette technologie reste élevé. Malgré ces défis, le moteur synchrone à réluctance variable continue d'attirer l'attention en raison de ses avantages potentiels en termes de fiabilité, d'efficacité et de maintenance réduite, ce qui en fait une option attrayante pour les applications nécessitant des performances élevées et une durabilité accrue.

✚ Moteurs asynchrones (MAS)

De nombreux constructeurs pensent à utiliser un moteur asynchrone. Il existe deux catégories de moteurs : les moteurs à bagues et les moteurs à cage d'écureuil. Le moteur asynchrone à cage est robuste. Il possède une puissance de masse assez importante, ce qui améliore l'efficacité de la chaîne de traction. En introduisant de nouvelles méthodes de commande, le MAS est le candidat parfait pour faire fonctionner les véhicules électriques (VE). Actuellement, les techniques de commande les mieux adaptées pour piloter une machine en vitesse variable avec une grande souplesse sont la commande directe du couple DTC et la commande vectorielle à flux rotorique orientée FOC [38].

Donc, à chaque application de propulsion électrique s'applique un type de moteur différent. Il n'y a pas de moteur universel, tout comme pour les batteries et les contrôleurs. Le spécifique donnant toujours un meilleur résultat que le standard. Chacun des moteurs a des avantages et des inconvénients, mais ce sont essentiellement les notions de coût et de difficulté de la commande qui s'affrontent. Le Tableau 2.3 ci-dessous résume bien, de manière qualitative, les avantages et les inconvénients des principaux types de moteurs utilisés dans les véhicules électriques.

Tableau 2.3 : Comparaison des motopropulseurs utilisés en traction électrique.

| | MCC | MAS | MSAP | MRV |
|---|----------|-----------------|----------|----------|
| Rendement maximal | Bon | Moyen | Très bon | Moyen |
| Rendement moyen | Moyen | Bon | Très bon | Bon |
| Vitesse maximale | Passable | Bon | Bon | Bon |
| Coût d'électronique de puissance | Très bon | Passable | Moyen | Bon |
| Coût du moteur | Passable | Bon | Moyen | Très bon |
| Espace couple-vitesse | Moyen | Moyen | Très bon | Bon |

Dans notre contexte, le moteur asynchrone est le choix privilégié. D'une part, cette machine est la plus répandue dans les applications industrielles où la variation de vitesse, une précision de régulation élevée et des performances en couple supérieures sont essentielles. D'autre part, son utilisation est favorisée par l'expérience considérable accumulée dans le domaine des

moteurs électriques, et elle commence même à être adoptée dans les chariots de manutention. Dans les applications nécessitant de grandes puissances, jusqu'à plusieurs dizaines de mégawatts, le moteur asynchrone reste largement préféré, conservant ainsi sa place prépondérante dans le domaine de la traction ferroviaire [35].

2.4.1. Modèle mathématique du moteur asynchrone triphasé

Le moteur asynchrone est perçu comme un système physique qui est influencé par des phénomènes électriques, magnétiques, mécaniques, thermiques, etc. Sa construction est simple, mais il présente un système non linéaire avec six équations différentielles complexes à étudier. Ainsi, sa demande nécessite la présence d'un modèle qui reflète fidèlement son comportement dynamique. L'utilisation de la transformation de Park sous certaines hypothèses simplificatrices, aide à modéliser les régimes transitoires et permanents du moteur afin de simplifier sa commande, il s'agit d'une série de transformations mathématiques simplifiant le modèle de la machine en gardant l'aspect physique des grandeurs transformées, cet outil pourrait garantir une représentation biphasée équivalente du système triphasé, ce qui permet de réduire considérablement la complexité du modèle, pour plus de détails sur la modélisation du MAS, on peut suggérer au lecteur de consulter les références suivantes : [40], [41], [42] et [43]. À ce stade et pour un objectif de commande, nous présentons le modèle mathématique utilisé pour le contrôle direct du couple (chapitre 03) d'un moteur asynchrone triphasé, dans un référentiel lié au stator « $\alpha - \beta$ », le comportement dynamique de la machine peut être exprimé par la représentation d'état donnée par (2.1) qui décrit un système non linéaire d'ordre 5.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \\ \varphi_{s\alpha} \\ \varphi_{s\beta} \\ \omega_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\gamma i_{s\alpha} - \omega_r i_{s\beta} + K\varphi_{s\alpha} + \frac{\omega_r}{\sigma L_s} \varphi_{s\beta} \\ \omega_r i_{s\alpha} - \gamma i_{s\beta} - \frac{\omega_r}{\sigma L_s} \varphi_{s\alpha} + K\varphi_{s\beta} \\ R_s i_{s\alpha} \\ R_s i_{s\beta} \\ \frac{3}{2J_m} (\varphi_{s\alpha} i_{s\beta} - \varphi_{s\beta} i_{s\alpha}) - \frac{f_c}{J_m} \omega_r - \frac{T_L}{J_m} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma L_s} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma L_s} \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{s\alpha} \\ U_{s\beta} \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

Avec:

- $\sigma = 1 - \frac{M^2}{L_s L_r}$ Le coefficient de dispersion de Blondel ;
- $T_s = \frac{L_s}{R_s}$ et $T_r = \frac{L_r}{R_r}$ Les constantes de temps statorique et rotorique respectivement ;
- $\omega_r = p\Omega_r$ La pulsation mécanique du rotor et p le nombre de paires de pôles du MAS ;
- $K = \frac{1}{\sigma L_s T_r}$, $\gamma = -\frac{1}{\sigma} \left(\frac{1}{T_r} + \frac{1}{T_s} \right)$.

2.5. Cinématique de Braquage

Un différentiel électronique est un dispositif de contrôle intégré dans les systèmes de gestion de la dynamique du véhicule (VDC) et de contrôle de stabilité électronique (ESC). Il utilise des capteurs de vitesse de roue et d'autres paramètres pour détecter les variations de vitesse entre les roues motrices d'un véhicule. Lorsqu'un véhicule se déplace à faible vitesse, il peut effectuer un virage sans générer de forces latérales significatives. Cela signifie que le vecteur vitesse sur chaque roue est aligné avec l'axe de déplacement et aucun glissement latéral n'est observé. Ce phénomène est connu sous le nom de condition d'Ackermann, comme illustré dans la Figure 2.5 [44], [45].

L'angle de braquage δ appliqué par le conducteur est appelé angle d'Ackermann. Les angles de braquage de chaque roue avant sont liés à l'angle d'Ackermann selon les équations suivantes (lors d'un virage à gauche) :

$$\delta_l = \tan^{-1}\left(\frac{L}{L \cdot \cot(\delta) - \frac{l_w}{2}}\right) \quad (\text{Lors d'un virage à gauche}) \quad (2.2)$$

$$\delta_r = \tan^{-1}\left(\frac{L}{L \cdot \cot(\delta) + \frac{l_w}{2}}\right) \quad (\text{Lors d'un virage à droite}) \quad (2.3)$$

La condition d'Ackermann est une condition statique qui s'applique lorsque le véhicule est à l'arrêt, donc à vitesse nulle. Elle est généralement utilisée pour des analyses concernant les manœuvres à basse vitesse, telles que les manœuvres de stationnement. À des vitesses plus élevées, le mouvement de virage est principalement influencé par le glissement latéral (side slip). Le point représente le centre de virage du véhicule.

$\delta > 0 \rightarrow$ Virage à droite

$\delta < 0 \rightarrow$ Virage à gauche

$\delta = 0 \rightarrow$ Tout droit

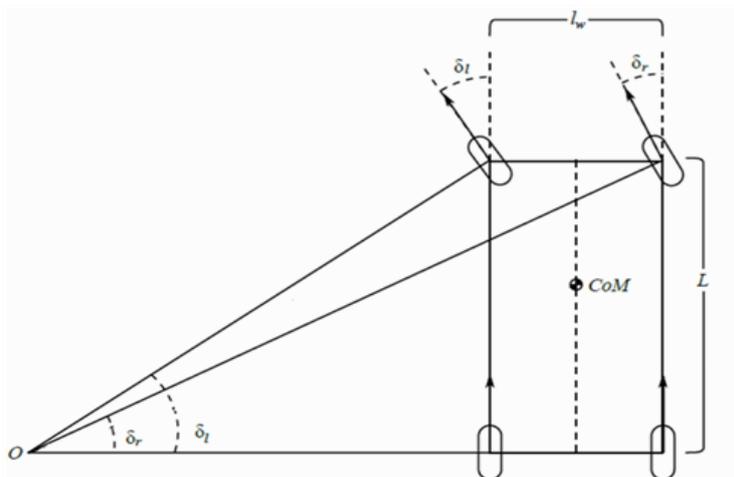


Figure 2.5 : Angles de braquage - Condition d'Ackermann respecté.

2.6. Modèle dynamique du véhicule électrique

2.6.1. Bilan des forces appliquées au véhicule électrique

Afin de pouvoir simuler la mission d'un véhicule, il faut être capable de déterminer quels sont les couples et les vitesses imposés au moteur de traction en interaction avec le profil de la route. Pour ce faire, nous établissons un bilan des efforts appliqués au véhicule. Figure 2.6 montre les forces agissant sur un véhicule qui monte une pente. L'effort de traction F_{tot} dans la zone de contact entre les pneus des roues motrices et la surface de la route propulse le véhicule en avant et arrière. Il est produit par le couple de la centrale et il est transféré à travers transmission et entraînement final aux roues motrices. Pendant que le véhicule roule, il y a une résistance qui tente d'arrêter son mouvement. La résistance comprend généralement le roulement des pneus, résistance aérodynamique et résistance en montée.

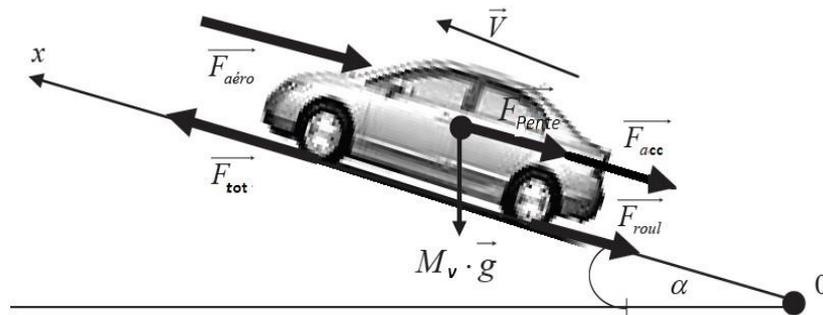


Figure 2.6 : Forces agissant sur un véhicule dans un cas général de mouvement.

Comme il est présenté dans la Figure 2.6, l'effort total F_{tot} nécessaire à l'avancement du véhicule d'après la loi du Newton est la somme des différentes composantes issues du bilan des forces mécaniques et aérodynamiques appliquées aux véhicules [46], [47] :

$$F_{tot} = F_{traction} = F_{roul} + F_{aero} + F_{pente} + F_{acc} \quad (2.4)$$

Avec :

F_{roul} : Force de roulement.

F_{aero} : Force de résistance aérodynamique.

F_{pente} : Force due au profil de la route.

F_{acc} : Force due à l'accélération.

a. Force de roulement

La masse du véhicule M_v , l'accélération gravitationnelle g et le coefficient de roulement des roues sont des facteurs qui influencent la force de résistance au roulement F_{roul} . En réalité, avec des pneus contemporains à faible résistance au roulement, le coefficient de résistance au

roulement C_{rr} est d'environ 0,01 (environ 0.015 pour des pneus traditionnels). Le coefficient varie en fonction de la largeur des pneus et de la surface de la route. Ainsi, la résistance au roulement est égale à [48] :

$$F_{roul} = g \cdot M_v \cdot C_{rr} \cdot \cos(\alpha) \quad (2.5)$$

Où :

g : L'accélération de pesanteur.

C_{rr} : Coefficient de résistance au roulement.

M_v : Masse totale du véhicule.

b. Force de résistance aérodynamique

Selon les différentes formes de carrosserie, la force de résistance aérodynamique est liée à la masse volumique de l'air ρ , au carré de la vitesse de véhicule et à la vitesse de vent, à la section frontale du véhicule S_f et à son coefficient de pénétration dans l'air, $C_{px} \in [0.25 - 0.5]$.

La relation suivante fournit son expression [49], [50] :

$$F_{aero} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S_f \cdot C_{px} \cdot (V_{veh} + V_{vent})^2 \quad (2.6)$$

Avec :

V_{veh} : Vitesse linéaire du véhicule.

S_f : Section frontal.

C_{px} : Coefficient de pénétration dans l'air.

V_{vent} : Vitesse du vent.

c. Force due au profil de la route

La puissance associée au profil du chemin La figure 2.8 illustre la force de résistance requise pour un véhicule de masse M_v pour surmonter une pente, qu'elle soit une montée ou une descente. Il est nécessaire de cartographier la pente en fonction de la distance afin de caractériser le profil de la route sur un parcours spécifique, et de déterminer ce qui permet de déduire la pente à chaque instant. Cette puissance est attribuée à [49], [50] :

$$F_{pent} = g \cdot M_v \cdot \sin(\alpha) \quad (2.7)$$

L'angle de la pente est représenté par α . Afin de faciliter les calculs, on utilise souvent la pente pour substituer $\sin(\alpha)$ pour des valeurs faibles.

$$F_{pent} = g \cdot M_v \cdot pente \quad (2.8)$$

Avec :

M_v : Masse totale du véhicule.

d. Force due à l'accélération

L'accélération F_{acc} fournit la force nécessaire pour assurer le comportement dynamique désiré par le conducteur. On obtient cette force en multipliant la masse du véhicule par l'accélération demandée par le conducteur [51].

$$F_{acc} = M_v \cdot \gamma \quad (2.9)$$

Où :

γ : L'accélération véhicule.

Le coefficient est positif pendant une phase d'accélération et négatif pendant une phase de décélération. L'expression suivante donne la puissance à fournir aux roues en fonction de la vitesse de déplacement [48] :

$$P_{fournir} = F_{tot} \cdot V_h \quad (2.10)$$

La relation entre le couple résistant à la roue C_r et l'effort résistant est la suivante :

$$C_r = F_{tot} \cdot R_w \quad (2.11)$$

Où :

R_w : Rayon de la roue.

C_r : Le couple résistant.

La relation entre la vitesse de la roue Ω_{roue} et la vitesse du véhicule V_h (m/s) est la suivante :

$$\Omega_{roue} = \frac{V_{veh}}{R_w} \quad (2.12)$$

La puissance mécanique du moteur requise pour conduire le véhicule est donnée par l'équation :

$$P_m = \frac{F_{traction} \cdot V_h}{\eta_t} \quad (2.13)$$

Où :

$F_{traction}$: Force totale ou la force de traction.

V_h : Vitesse du véhicule.

η_t : Rendement du système de transmission.

Le rapport de transmission est généralement exprimé comme le rapport entre la vitesse de rotation de l'arbre de sortie et la vitesse de rotation de l'arbre d'entrée du moteur. $T = \frac{\omega_{sortie}}{\omega_{entré}}$

2.6.2. Choix de l'exemple du véhicule électrique

Afin de préserver un contexte réaliste pour notre étude, nous avons opté pour un modèle de véhicule électrique déjà disponible sur le marché automobile, à savoir la Volkswagen e-UP illustrée dans la Figure 2.7, qui est la première voiture entièrement électrique proposée par le fabricant allemand [52]. Nous avons opté pour la Volkswagen e-UP car sa fiche technique est extrêmement exhaustive par rapport à d'autres fabricants de véhicules électriques. Cela nous a permis d'avoir une vision globale des performances et des caractéristiques du véhicule, telles que l'autonomie en énergie, les puissances nécessaires, la

vitesse maximale, la tension du bus continu, plus encore. Grâce à toutes ces données, nous pourrions baser notre étude sur une application concrète. Les spécificités techniques.

Tableau 2.4 : Caractéristiques techniques de la Volkswagen e-UP

| Paramètres | Valeur |
|-------------------------------|--|
| Moteur électrique | |
| Technologie moteur électrique | Machine Asynchrone à cage d'écureuil |
| Puissance maximum à tr/min | 37 KW de 1480 tr/min |
| Batterie | |
| Type | Lithium ion |
| Poids | 510 Kg |
| Localisation | Intégrée au plancher entre les essieux |
| Capacité nominale | 2,6 KWh / 100 Ah |
| Nombre de cellules / modules | 204 / 17 |
| Dimensions | |
| Poids à vide | 1154 Kg |
| Poids totale autorisé | 1530 Kg |
| Longueur | 3,540 m |
| Largeur | 1,645 m |
| Hauteur | 1,492 m |
| Performances | |
| Vitesse de pointe | 160 Km/h |
| Temps de 0 à 100 Km/h | 12,4 s |
| Consommation par 100 Km | 11,7 Kwh |
| Autonomie en cycle NEDC | 160 Km |
| Autonomie en saison froide | 80 à 120 Km |



Figure 2.7 : Volkswagen e-UP.

Afin d'obtenir des résultats réalistes et de dimensionner correctement les unités de stockage d'énergie, nous associons le modèle mécanique en détail présenté dans la première partie aux paramètres de la Volkswagen e-UP. Le tableau 2.5 présente les divers paramètres employés pour exprimer la force de traction.

Tableau 2.5 : Paramètres du modèle mécanique du véhicule.

| Paramètres | Symbole | Valeur |
|--|--------------|------------------------------------|
| Pois du véhicule | M_v | 1530Kg |
| Constante gravitationnelle | g | 9,81ms ⁻² |
| Densité volumique de l'air | ρ_{air} | 1,205Kg ^m -3 |
| Coefficient de résistance au roulement | C_{rr} | 0,01s ² m ⁻² |
| Section frontale du véhicule | S_f | 2,4543m ² |
| Coefficient de pénétration dans l'air | C_{px} | 0,25 |
| Coefficient sans dimension permettant de prendre en compte les moments d'inertie des masses tournantes | σ | 1,05 |
| Rayon de la roue | R_w | 0,27m |

2.7. Profils de conduite

Les profils de conduite ou de vitesse reflètent les variations de vitesses en fonction du temps qu'un véhicule expérimente lorsqu'il est en déplacement sur une route. Ils servent à évaluer la performance du véhicule lors de simulations. Parmi les différents types de profils de conduite, on retrouve le New European Driving Cycle (NEDC), l'Urban Dynamometer Driving Schedule (UDDS), le High Way Fuel Economy Test Driving Schedule (HFEDS ou HWFET) et US06 (voir figure 2.8).

Les principales caractéristiques des différents cycles de conduite sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau 2.6 : Principales caractéristiques des différents cycles de conduite.

| | HWFET | UDDS | NEDC | US06 |
|------------------------|-------|-------|--------|-------|
| Durée du cycle (s) | 800 | 1400 | 1180 | 600 |
| Distance (km) | 17 | 17.05 | 11.023 | 12.88 |
| Vitesse moyenne (km/h) | 80 | 45 | 33.6 | 70 |

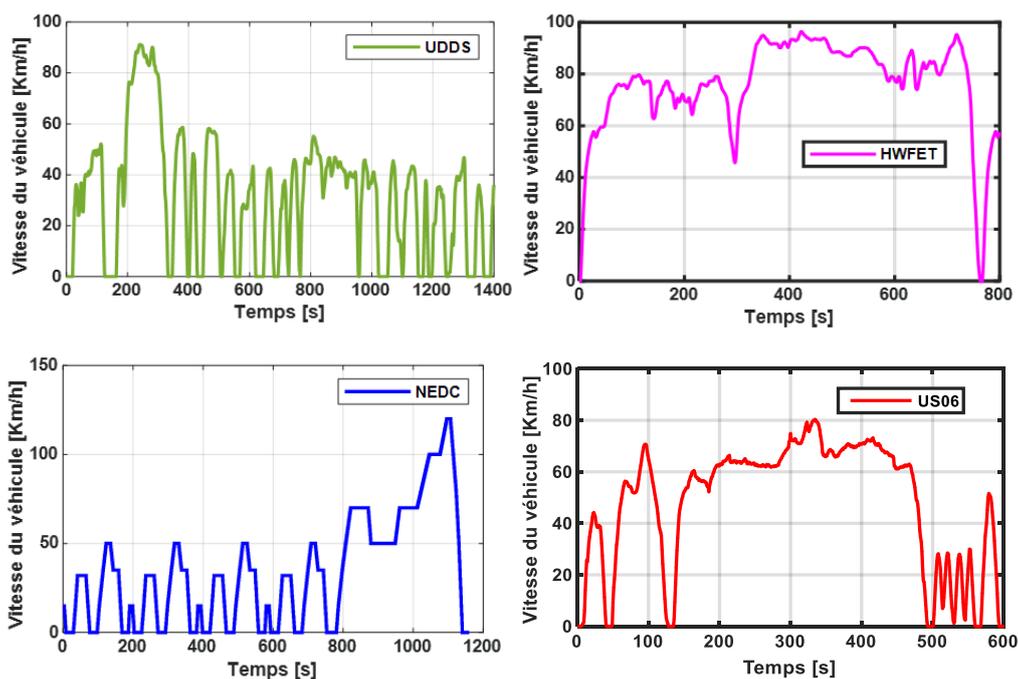


Figure 2.8 : Graphiques des profils de conduite HWFET, UDDS, US06 et NEDC.

2.8. Dimensionnement des sources d'énergie

Une fois que le modèle dynamique du véhicule a été conçu et que les paramètres de simulation ont été choisis. Nous allons maintenant examiner la dimension des sources d'énergie électrique. Grâce aux résultats de la taille, nous pourrions sélectionner les quantités de cellules pour chaque source d'énergie.

2.8.1. Dimensionnement de la pile à combustible

Lorsqu'il s'agit de déterminer les sources principales et secondaires d'énergie pour un véhicule, telles que la pile à combustible et l'élément de stockage, il est essentiel de définir clairement les rôles de ce dernier. Les fonctions suivantes doivent être prises en compte pour l'élément de stockage selon [53] :

- ✚ Fournir de la puissance de traction pendant le démarrage de la PAC. Au démarrage, la PAC ne peut pas fournir toute sa puissance et c'est la batterie ou le supercondensateur qui doit la soutenir ;
- ✚ Fournir de la puissance pendant les cycles de conduite. Par exemple, l'élément de stockage peut soutenir la PAC lorsque la puissance de la charge dépasse la puissance maximale de cette dernière. Il peut aussi soutenir la PAC grâce à sa dynamique plus rapide (plus grande puissance spécifique) ;
- ✚ Fournir de la puissance afin que le véhicule puisse satisfaire les contraintes de pente maximale et d'accélération ;
- ✚ Capturer l'énergie régénérative lors des phases de freinage.

Afin de faciliter le processus de dimensionnement, il est possible d'avancer certaines hypothèses au départ :

- **Hypothèse 1 :** La pile à combustible fournira la puissance nécessaire pour maintenir la vitesse constante du véhicule sur un terrain plat ou rocailleux sans nécessiter le soutien de l'élément de stockage.
- **Hypothèse 2 :** Le dispositif de stockage soutient la pile à combustible en fournissant l'énergie nécessaire lors de l'accélération et des points de charge.

Un modèle dynamique du PEMFC repose sur la corrélation entre la tension de sortie et la pression potentielle de l'hydrogène, de l'oxygène et de l'eau.

La tension thermodynamique générée par les réactions électrochimiques est donnée par l'équation de Nernst comme suit [54] :

$$E_n = 1.229 + (T - 298) \cdot \frac{-44.43}{2F} - \frac{R \times T}{2F} \ln\left(\frac{1}{P_{H_2} \cdot \sqrt{P_{O_2}}}\right) \quad (2.14)$$

Où P_{H_2} et P_{O_2} sont les pressions partielles d'hydrogène et d'oxygène (atm), T est la température de fonctionnement(K), F et R sont la constante de Faraday (C/mol) et la constante des gaz parfaits (J/mol K).

Les pressions partielles sont déterminées en termes d'utilisations (taux de conversion) des réactifs comme suit :

$$P_{H_2} = (1 - U_{fH_2}) \cdot x\% \cdot P_f \quad (2.15)$$

$$P_{O_2} = (1 - U_{fO_2}) \cdot y\% \cdot P_{air} \quad (2.16)$$

Où U_{fH_2} et U_{fO_2} sont les utilisations de l'hydrogène et de l'oxygène, P_{fuel} et P_{air} sont les pressions d'alimentation du combustible et de l'air (atm) fourni par le compresseur, x et y sont les pourcentages de concentration d'hydrogène et d'oxygène dans le combustible et dans l'air(%).

Les utilisations des réactifs sont exprimées en termes de débits d'entrée et de courant de cellule comme suit :

$$U_{fH_2} = \frac{60000 \cdot R \cdot T \cdot i_{fc}}{2F \cdot P_{fuel} \cdot V_{fuel} \cdot x\%} \quad (2.17)$$

$$U_{fO_2} = \frac{60000 \cdot R \cdot T \cdot i_{fc}}{4F \cdot P_{air} \cdot V_{O_2} \cdot y\%} \quad (2.18)$$

Où V_{fuel} et V_{O_2} sont les débits de l'hydrogène et de l'oxygène fourni à la pile en (l/min), i_{fc} est le courant de la cellule (A).

La tension en circuit ouvert de la cellule est proportionnelle à la tension thermodynamique est donnée par :

$$E_{oc} = K_c \cdot E_n \quad (2.19)$$

Où K_c est la constante de tension. Compte tenu des pertes dues à la cinétique de réaction (pertes d'activation) et au transport d'espèces (pertes résistives et par diffusion), la tension de sortie de la cellule d'une pile à combustible est donnée par :

$$V_{cell} = E_{oc} - V_{act} - V_r \quad (2.20)$$

Avec :

$$V_{act} = A \cdot N \cdot \ln\left(\frac{i_{fc}}{i_0}\right) \cdot \frac{1}{\left(\frac{s \cdot \tau_d}{3}\right)+1} \quad (2.21)$$

$$V_r = r_{ohm} \cdot i_{fc} \quad (2.22)$$

Où V_{cell} est la tension de la cellule d'une pile PEMFC (V), E_{oc} est la tension en circuit ouvert (V), V_{act} est la surtension d'activation, V_{ohm} représente la surtension ohmique, i_{fc} décrit le courant de la pile PEMFC (A), N est le nombre de cellules, A est la pente de Tafel (V), i_0 désigne le courant d'échange (A), et τ_d présente le temps de stabilisation de la cellule à un échelon de courant.

On suppose que la tension de la cellule présentera un retard approximativement égal à 3 fois la constante de temps lors d'un changement soudain du courant de la cellule.

Le courant d'échange et la pente de Tafel sont donnés par :

$$i_0 = \frac{2 \cdot F \cdot K (P_{H_2} + P_{O_2})}{R \cdot h} \cdot \exp\left(\frac{-\Delta G}{RT}\right) \quad (2.23)$$

$$A = \frac{R \cdot T}{2 \cdot \alpha \cdot F} \quad (2.24)$$

Où ΔG est la barrière énergétique d'activation (J/mol), α est le coefficient de transfert de charge, k et h sont respectivement la constante de Boltzmann (J/K) et la constante de Planck (Js).

La tension de sortie de la pile à combustible (plusieurs cellules en série) est dérivée en connaissant le nombre de cellules comme suit :

$$V_{fc} = N \cdot V_{cell} \quad (2.25)$$

Où N est le nombre de cellules.

La puissance de sortie de la pile PEMFC est formulée par :

$$P_{fc} = \eta_{fc} \cdot V_{fc} \cdot i_{fc} \quad (2.26)$$

Où P_{fc} est la puissance de sortie (W) et η_{fc} désigne l'efficacité de la pile PEMFC. Les paramètres PEMFC sont donnés dans le tableau 2.7.

À la figure 2.9, les courbes de la puissance de traction du moteur versus vitesse constante (pour des pentes de 0% et 5%) et versus temps d'accélération sont présentées. Pour une vitesse constante de 160 km/h, on peut voir dans cette figure qu'une puissance du moteur de 43 kW suffit pour conduire le véhicule à vitesse constante et de vitesse maximale constante alors qu'une puissance du moteur de 75 kW est nécessaire pour accélérer le véhicule de 0 à 100 km/h en 10 secondes tout en satisfaisant les performances de pente maximale de 5%.

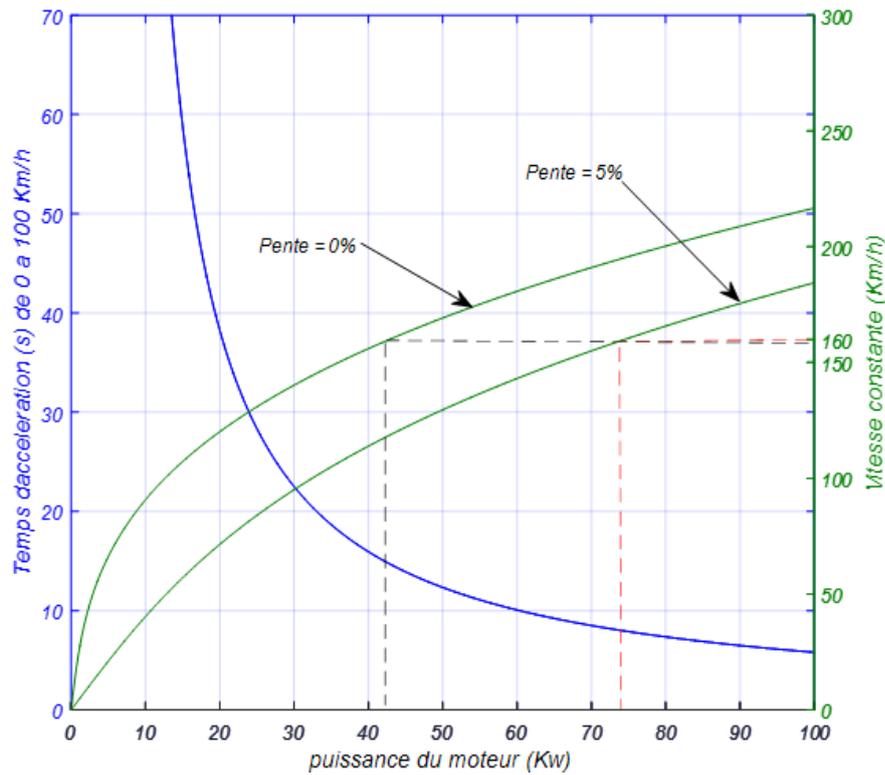


Figure 2.9 : Puissance du moteur vs temps d'accélération et vs vitesse constante.

La relation entre la puissance mécanique du moteur (P_m), la puissance de la PAC (P_{fc}) et la puissance de l'élément de stockage (P_{ES}) est donné par l'expression suivante [53] :

$$P_{ES} = \frac{P_m}{\eta_m} - P_{fc} \quad (2.27)$$

Où η_m est le rendement du moteur (on suppose que le rendement est égal à 90%).

Selon l'hypothèse 1, la PAC devra fournir la puissance demandée pour l'opération du véhicule à vitesse constante (pente = 0%) sur une route plate ou en pente, sans le soutien de l'élément de stockage. Alors, en utilisant l'équation 2.27, la puissance de la PAC est obtenue :

$$0 = \frac{43}{0,9} - P_{fc} \Rightarrow P_{fc} = 47.77 \text{ kW} \quad (2.28)$$

On choisit $P_{fc} = 50 \text{ kW}$.

Tableau 2.7 : Paramètres de la pile à combustible.

| Paramètre | Symbole | Valeur |
|-------------------------------------|--|---------------------|
| Puissance nominale | $P_{fc,n}$ | 50 kW |
| Puissance maximale nette | $P_{fc,max}$ | 54 kW |
| Tension à 0A et 1A [V_0(V), V_1(V)] | [V_0(V), V_1(V)] | [143.5 - 103.5] |
| Point nominal de fonctionnement | [I _N - V _N] | [486.4 A - 103.5 V] |
| Point de fonctionnement maximal | [I _{max} - V _{max}] | [538.5 A - 100 V] |
| Nombre de cellule | N _{cell} | 85 |
| Efficacité nominale | (%) | 53% |
| Température de fonctionnement | T | 65°C |
| Débit d'air nominal | V _{air} | 2897 lpm |
| Pression d'alimentation nominale | [P _{fuel} P _{air}] | [1.5bar 1bar] |
| Résistance de la pile à combustible | R | 0.079335 Ω |
| Tension de Nerst de la cellule | E _n | 1.2003 V |
| Courant d'échange | i ₀ | 610.2139 A |
| Composition nominale d'hydrogène | [X _{H2}] | 99.95 % |
| Composition nominal d'oxygène | [Y _{O2}] | 21 % |
| Composition nominal H2O(Air) | [Air %] | 1 % |

Basé sur les spécifications techniques de la pile PEMFC, les courbes de polarisation prédéterminées puissance-courant (P-I) et tension-courant (U-I) sont présentées dans la figure 2.10.

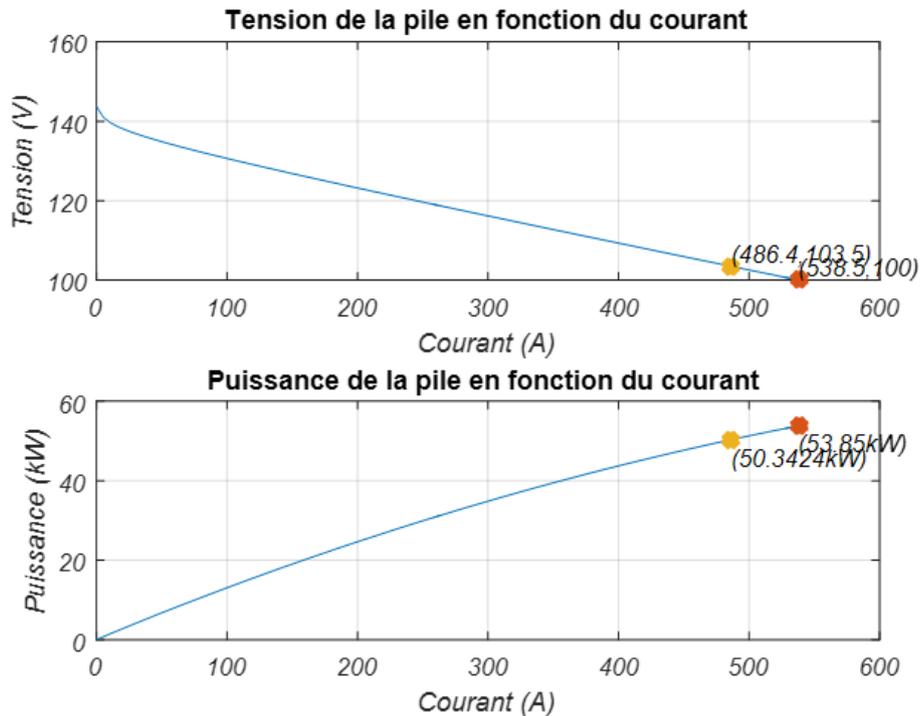


Figure 2.10 : Courbes de polarisation de la pile PEMFC.

2.8.2. Dimensionnement de la batterie

Afin d'évaluer la puissance et la capacité de l'élément de stockage, il sera nécessaire de prendre en compte le profil de conduite à suivre. Les profils de conduite à prendre en compte

comprennent les cycles de conduite urbaine (Urban Dynamometer Driving Schedule: UDDS), d'autoroute (High Way Fuel Economy Test Driving Schedule: HFEDS ou HWFET) et US6. Les courbes de puissance et d'énergie pour ces profils de conduite sont illustrées dans la figure 2.11.

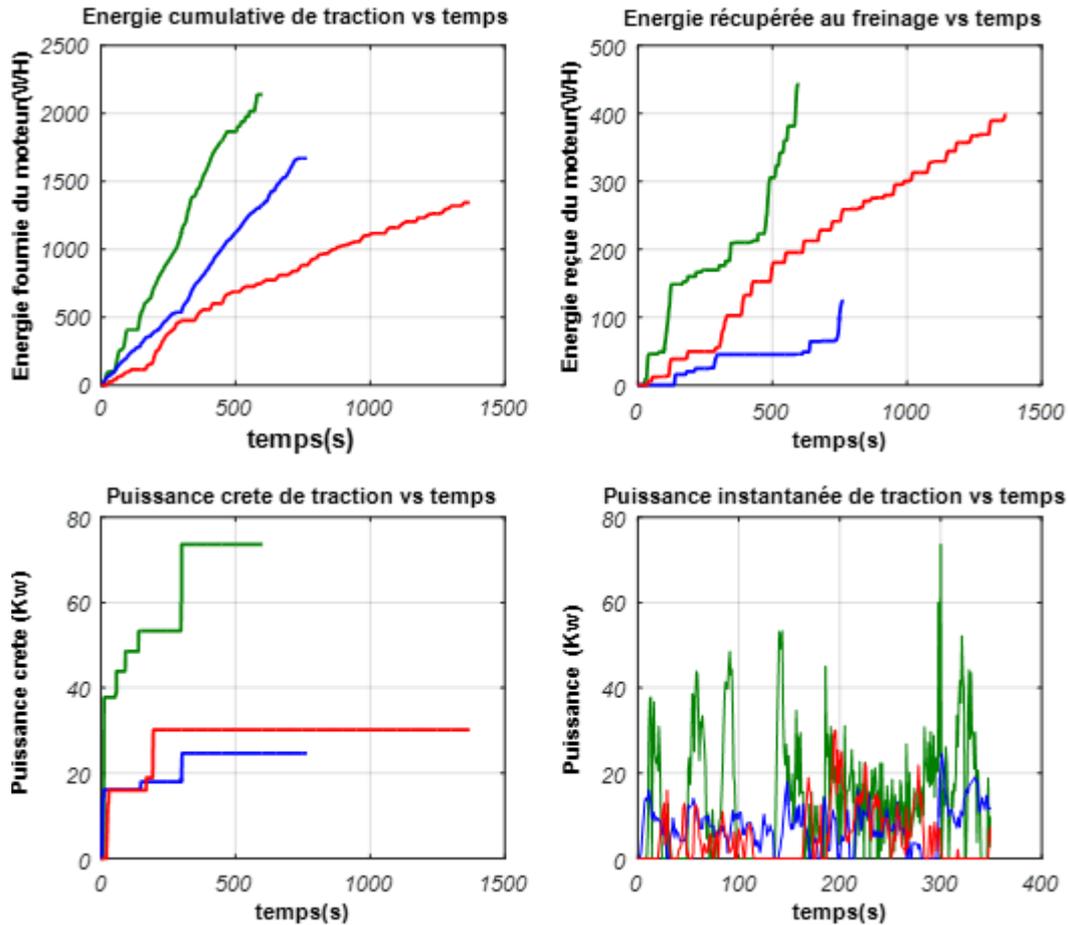


Figure 2.11 : Graphiques de puissance et d'énergie pour les profils de conduite US6 (Vert), urbaine UDDS (Rouge) et d'auto route HWFET (Bleu).

Selon l'hypothèse 02, l'élément de stockage d'énergie par batterie doit apporter son soutien à la PAC lors des accélérations et des pics de puissance de la charge. Comme illustré dans la figure 2.11, le cycle de conduite US6 offre la puissance maximale (puissance de crête de 75 kW). En appliquant à nouveau l'équation 2.27 et en utilisant la puissance de la PAC sélectionnée précédemment, on obtient la puissance de l'ES :

$$P_{ES} = \frac{P_m}{\eta_m} - P_{fc} = \frac{75}{0.9} - 50 = 33.33 \text{ kW} \quad (2.29)$$

On choisit $P_{ES} = 40 \text{ kW}$.

Puisque le moteur a une puissance de 74 kW.

D'après les résultats on peut voir que le cycle de conduite US6 génère aussi la plus grande récupération d'énergie lors de freinages (450 Wh). Sachant que la tension du bus continu (CC) est de 400 V_{dc}, on choisira la tension de la batterie égale à 300V. De plus, on considère que la batterie aura un SOC maximal (SOC_{max}) égal à 80% et un SOC minimal (SOC_{min}) égal à 40%. Alors, nous avons un taux de décharge égale à :

$$DOD = 80\% - 40\% = 40\% \quad (2.30)$$

Pour déterminer les caractéristiques de la batterie, nous nous servirons des spécifications d'un produit commercial présenté dans le tableau 2.8. Celles qui correspondent au module de batteries LiFePo4 de SAFT (on choisit le module identifié par la référence : NHE 10-100).

Tableau 2.8 : Spécifications de la batterie au Lithium-ion de 24V (100Ah et 2.6Wh) (LiFePo4).

| Batterie au Lithium-ion de 24V (100Ah et 2.6Wh) | |
|--|---------------------------------|
| Téchnologie | Lithium fer phosphate (LiFePo4) |
| Tension nominale | 25.6V |
| Capacité nominale | 100Ah |
| Puissance nominale | 2.6KWh |
| Poids | 30kg |
| Rapport de puissance/Poids | 86Wh/kg |
| Dimensions (L*H) | 592*154*278 mm |
| Température de l'exploitation lors de charge | 0 - 45°C |
| Température de l'exploitation lors de décharge | -20°C - 55°C |
| Température de stockage | -20°C - 45°C |

Afin que la batterie puisse récupérer toute l'énergie au freinage, son énergie totale doit être :

$$E_{tot_bat} = \frac{E_{utilisable\ bat}}{DOD} = \frac{450}{0.40} = 1125\ Wh \quad (2.31)$$

En prenant la tension nominale d'un module de batterie pour 24 V. Le nombre de batteries connectées en série est de :

$$N_{bat} = \frac{V_{bus}}{V_{Nbat}} = \frac{400}{24} = 16.66 \approx 17\ batteries \quad (2.32)$$

A partir de ces données ci-dessus et la tension maximale de la batterie V_{max_1bat} égale à 27.675V (V_{min_1bat} = 21.135V), il est possible de déterminer la capacité minimale de la batterie :

$$C_{min_bat} = \frac{E_{tot_bat}}{V_{max_bat}} = \frac{1125}{17 \cdot 27.675} = 2.4\ Ah \quad (2.33)$$

Les spécifications indiquent également que le poids d'un module de batteries (1bat Weight) est de 30 kg et que l'énergie spécifique (spécifique E) est de 86 Wh/kg. Ainsi, la quantité d'énergie disponible pour connecter 17 modules de batteries en série est :

$$E_{17bat_série} = E_{spécifique} \cdot weight_{1bat} \cdot N_{bat} \quad (2.34)$$

$$E_{17bat_série} = 86 \cdot 30 \cdot 17 = 43860\ Wh = 43.860\ kWh$$

On peut conclure que cette valeur est bien supérieure à la valeur de E_{tot_bat} calculée précédemment. Ainsi, la batterie pourrait utiliser l'énergie lors des freinages et fournir de la puissance de traction lors du démarrage de la PAC. On peut également conclure que la capacité nominale des batteries selon les spécifications (100 Ah) est supérieure à la capacité minimale C_{min_bat} (2.4 Ah) nécessaire pour récupérer toute l'énergie lors des freinages.

L'intensité spécifique (intensité spécifique P) est de 86 W/kg. Ainsi, il est possible de connecter 17 modules de batteries en série avec une puissance de :

$$P_{17bat_série} = P_{spécifique} \cdot weight_{1bat} \cdot N_{bat} \tag{2.35}$$

$$P_{17bat_série} = 86 \cdot 30 \cdot 17 = 43860 W = 43.860 kW$$

Qui correspond à la puissance de l'ES de 40 kW déterminé auparavant.

La capacité totale de 17 batteries est égale à :

$$C_{tot_bat} = C_{1bat} \cdot N_{bat} = 2.4 \cdot 17 = 40.8 Ah \tag{2.36}$$

Tableau 2.9: Caractéristiques du système de batteries Lithium-ion choisit.

| Paramètre | Symbole | Valeur |
|---|--------------------|------------|
| Nombre de modules de batterie en série | N_s | 17 |
| Capacité nominale | C_{n_bat} | 100 Ah |
| Capacité minimale de la batterie | C_{min_bat} | 2.4 Ah |
| Capacité totale de 17 batteries | C_{17bat} | 40.8 Ah |
| Tension nominale | V_{n_sc} | 25.6 V |
| Énergie disponible | E_{17bat_serie} | 43.860 kWh |
| Puissance disponible | $P_{17bat_série}$ | 43.860 kW |
| Poids | $Weight_{1bat}$ | 30kg |

À partir des paramètres d'entrée (tableau 2.9), les courbes de polarisation du modèle batterie sont présentées à la figure 2.12.

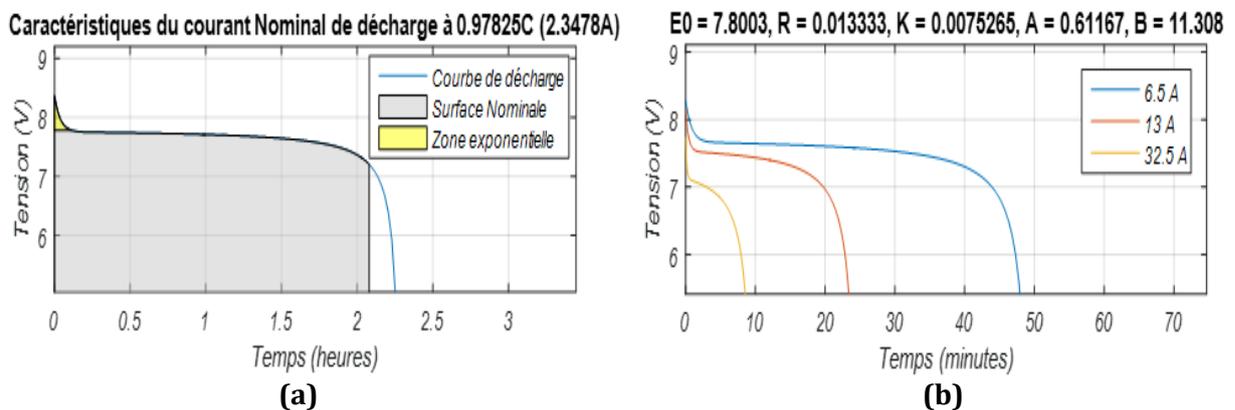


Figure 2.12 : Courbes de polarisation du batterie. (a) Caractéristiques de décharge du courant nominal. (b) Courant de décharge.

K : Coefficient de décharge, **R :** Résistance interne, **A et B :** pour représenter la relation entre la tension de la batterie et sa capacité résiduelle et **E₀ :** Tension à vide.

2.8.3. Dimensionnement du supercondensateur

Le supercondensateur (SC) est connu comme un composant électronique avec une réponse dynamique rapide et une densité de puissance élevée. Dans le système hybride, il peut être utilisé pour stocker l'énergie régénérative ou libérer plus d'énergie pour compenser la puissance de pointe lors de la variation brusque de charge. Dans cette étude, on utilise un SC afin de compenser la puissance de charge au démarrage de la pile à combustible.

Tableau 2.10: Spécifications du supercondensateur (Modules de 48V de NESSCAP)

| Capacité nominale (F) | Résistance interne (mΩ) | | Courant Max (A) | Courant de fuite (mA) | Energie stockée (Wh) | Energie spécifique (Wh/kg) | Poids nominal (kg) | Numéro de pièce |
|--|-------------------------|-------|--|-----------------------|----------------------|----------------------------|--------------------|---------------------|
| | A (100 Hz) | < 4.8 | | | | | | |
| Décharge avec un courant constant à 25°C | DC | | 1s Taux de décharge à 1/2V _R | 72 heures à 25°C | à V _R | Gravimétrique | | |
| 36 | <10.8 | <13.0 | 580 | <1.5 | 11.8 | 1.38 | 8.5 | EMHSR-0036C0-048R0S |
| 66 | <8.6 | <10.4 | 920 | <2.7 | 21.7 | 2.17 | 10.0 | EMHSR-0066C0-048R0S |
| 88 | <7.3 | <8.9 | 1160 | <3.0 | 28.9 | 2.51 | 11.5 | EMHSR-0088C0-048R0S |
| 111 | <6.0 | <7.1 | 1460 | <4.2 | 36.4 | 2.91 | 12.5 | EMHSR-0111C0-048R0S |
| 166 | <4.8 | <5.6 | 2030 | <5.2 | 54.5 | 3.63 | 15.0 | EMHSR-0166C0-048R0S |
| Tension Nominal V _R | | | 48.6V DC | | | | | |
| Tension de surveillance | | | 51.3V DC | | | | | |

En tenant compte des caractéristiques d'un module de Supercondensateur identifié avec le numéro de pièce EMHSR0166C0-048R0S (tableau 2.10), la tension nominale (V_{Nom_1SC}) est de 48,6V. Ainsi, lorsque V_{bus_cc} est de 400 V, il y a un nombre de modules de SC connectés en série :

$$N_S = \frac{V_{bus_cc}}{V_{Nom_1SC}} = \frac{400}{48.6} = 9 \quad (2.37)$$

L'énergie maximale (E_{max_sc}) qui peut être stockée dans le SC résulte :

$$E_{max_sc} = 450 \text{ Wh} \quad (2.38)$$

De plus, d'après la documentation technique, la tension maximale que le module du SC peut supporter (V_{max_1SC}) s'élève à 51,3V. Ainsi, lors de la connexion de 9 modules de SC en série, la tension maximale (V_{max_SC}) est de 461.7 V et la capacité minimale du supercondensateur en farads [F] est :

$$C_{min_sc} = \frac{E_{max_SC}}{\frac{1}{2} \cdot V_{0max}^2} = \frac{450 \cdot 3600}{\frac{1}{2} \cdot (461.7)^2} = 15.20 \text{ F} \quad (2.39)$$

Pour le dimensionnement du supercondensateur nous avons utilisé la spécification du supercondensateur (Modules de 48V de NESSCAP) avec une capacité nominale égale à 88 F.

Le poids total de modules de SC est égal à :

$$Weight_{tot_SC} = Weight_{1SC} \cdot N_{SC} = 9 \cdot 11.5 = 103.5 \text{ kg} \quad (2.40)$$

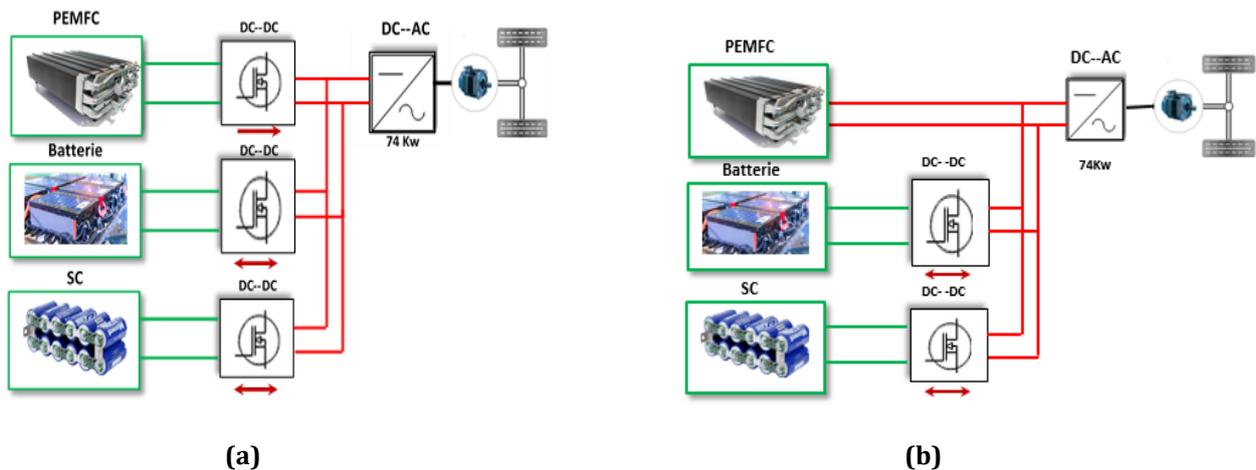
Les caractéristiques du système de SC sont résumées dans le tableau 2.11.

Tableau 2.11: Caractéristiques du système de SC (Modules NESSCAP de 48V).

| Paramètre | Symbole | Valeur |
|---------------------------------------|------------------|------------|
| Nombre de modules de SC en série | N_s | 9 |
| Capacité nominale | C_{n_sc} | 88 F |
| Tension nominale | V_{n_sc} | 48.6 V |
| Tension maximale | V_{max_SC} | 51.3 V |
| Capacité minimale | $C_{min \ 1SC}$ | 15.2 F |
| L'énergie maximale stockée dans le SC | $E_{max \ sc}$ | 450 Wh |
| Energie spécifique | $E_{spécifique}$ | 2.51 Kw/kg |
| Poids | $Weight_{1SC}$ | 11.5 Kg |

2.9. Topologies et configurations des systèmes

Le choix de la topologie du système d'alimentation hybride est crucial pour assurer son efficacité, sa légèreté et son coût optimal. Diverses topologies, issues de recherches antérieures, sont résumées dans la figure 2.13. Elles permettent de connecter les dispositifs énergétiques soit directement au convertisseur CC/CA (intégration directe), soit via un, deux ou trois convertisseurs CC/CC. Les besoins en puissance de crête et la direction du flux de puissance de chaque convertisseur sont également spécifiés. La tension d'entrée du convertisseur CC/CA est fixée à $400 V_{CC}$.



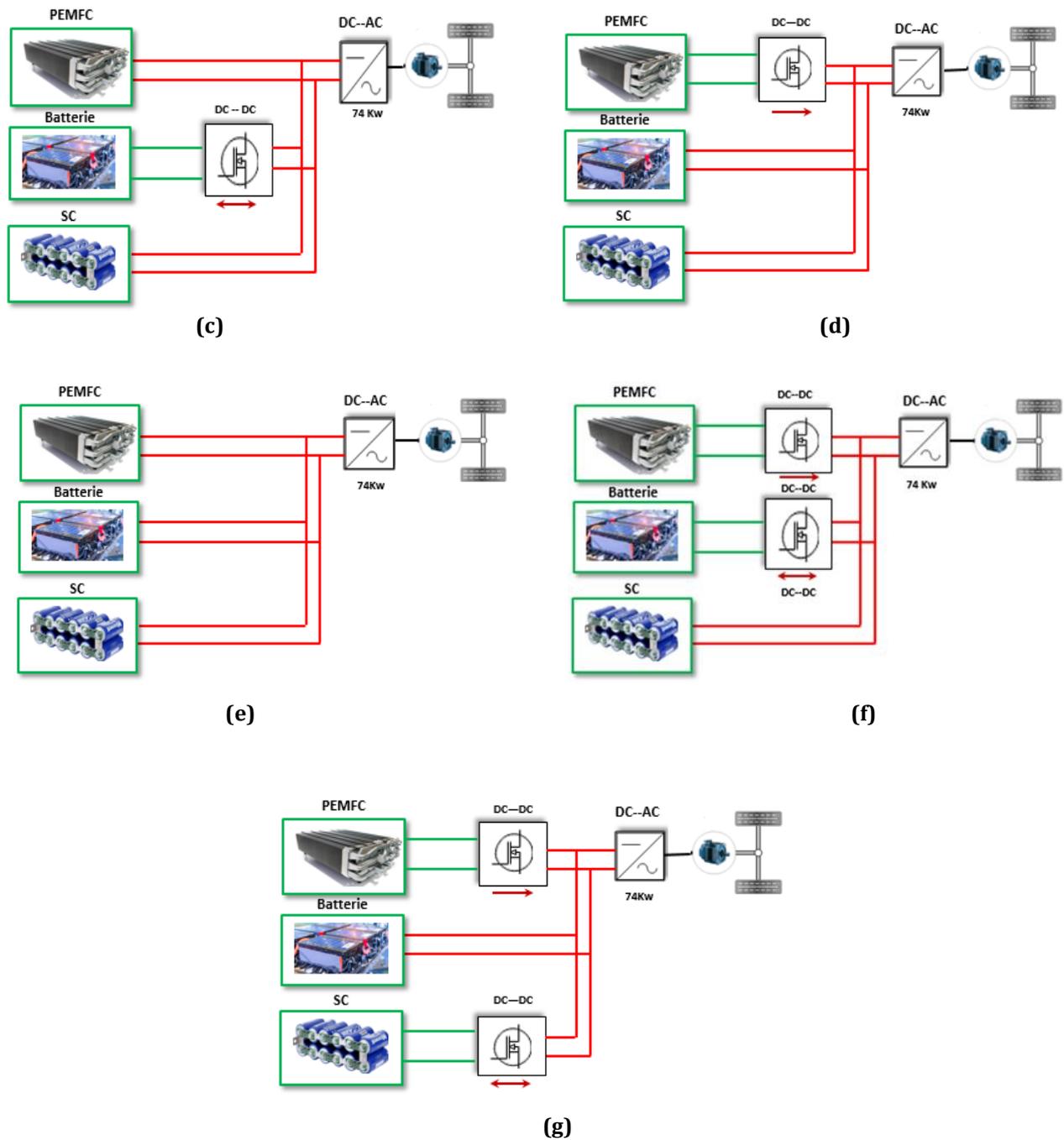


Figure 2.13 : Topologies de systèmes d'alimentation hybrides.

De plus, ces diverses configurations de véhicules électriques comportent de multiples avantages et inconvénients, comme le résume le tableau 2.12.

Comme le montre la topologie de la figure 2.13 (f) est plus attrayante en termes d'efficacité, de poids et de coût. Cette topologie est donc retenue pour l'étude, où le système de propulsion est alimenté par trois ressources énergétiques, la pile à combustible comme source primaire connectée via un convertisseur DC-DC boost à la tension du bus DC et comme source secondaire constituée par la batterie connectée via un convertisseur DC-DC buck-boost bidirectionnel à la tension du bus DC, et le supercondensateur connecté directement à la même

tension du bus DC. Différentes stratégies de gestion de l'énergie gèrent cette source d'énergie hybride.

Tableau 2.12 : Avantages et inconvénients des configurations.

| Configuration | Avantages | Inconvénients | Utilisation |
|---------------|--|---|------------------------------|
| (a) | <ul style="list-style-type: none"> - Les avantages de toutes les sources d'énergie utilisées ensemble. - La sécurité élevée des ressources énergétiques. - Topologie totalement opérationnelle. | <ul style="list-style-type: none"> - La méthode la plus complexe de contrôle. - Trois convertisseurs DC/DC offrent la meilleure performance du système. - Coût élevé. | La préférence des chercheurs |
| (b) | <ul style="list-style-type: none"> - Le stockage d'énergie permet de mieux contrôler le flux d'énergie entre les ressources énergétiques supplémentaires. - Un convertisseur unique DC-DC. | <ul style="list-style-type: none"> - La méthode de surveillance est plus complexe. - En raison de l'absence de contrôle de la pile à combustible, il est envisageable d'injecter du courant dans le système. (Courant inversé) Il arrive rarement. | Rarement utilisé |
| (c) | <ul style="list-style-type: none"> - Optimisation de la Gestion de l'Énergie. - Flexibilité et Réactivité. | <ul style="list-style-type: none"> -Complexité Systémique. - Coût. - Poids et Encombrement | Transport Électrique |
| (d) | <ul style="list-style-type: none"> - La division du flux d'énergie est simple. - Amélioration de la fiabilité et de la durabilité de la pile. | <ul style="list-style-type: none"> - une tension continue qui varie constamment. | Fréquemment utilisé |
| (e) | <ul style="list-style-type: none"> - La configuration la plus élémentaire - une perte de poids et de volume. - un convertisseur minimal de puissance. - une réduction de prix. | <ul style="list-style-type: none"> - Il est complexe de répartir correctement le flux de puissance. - Il est impossible de le contrôler. | Rarement utilisé |
| (f) | <ul style="list-style-type: none"> - La souplesse avec laquelle il est possible de répartir l'énergie. - Sa stabilité dépasse celle de la configuration (g). | <ul style="list-style-type: none"> - La conception des groupes motopropulseurs est compliquée. - La méthode de contrôle est plus complexe. | Le choix des chercheurs |
| (g) | <ul style="list-style-type: none"> - Les avantages de l'association de trois sources d'énergie distinctes - La possibilité de répartir l'énergie de diverses façons. | <ul style="list-style-type: none"> - Le groupe motopropulseur est devenu plus complexe à concevoir. - La connexion directe de la batterie au bus continu peut engendrer des difficultés en raison de sa réponse lente et de son courant d'ondulation élevé. | La préférence des chercheurs |

2.10. Modélisation des convertisseurs électriques

La chaîne de traction des véhicules électriques repose sur différents convertisseurs de puissance, parmi lesquels les plus couramment utilisés sont le redresseur, l'hacheur et l'onduleur.

2.10.1. Onduleurs

Ils agissent comme des convertisseurs continu-alternatif dans le contexte de la traction électrique. Ils transforment le courant continu des trois sources hybride (PEMFC/Batterie/SC) en trois phases de courant alternatif décalées de 120 degrés, offrant ainsi une flexibilité de fréquence de rotation aux moteurs alternatifs.

Cette adaptation permet de maintenir un rendement et une puissance optimale à tous les régimes de fonctionnement, la vitesse de rotation étant déterminée par la fréquence du courant alternatif [55].

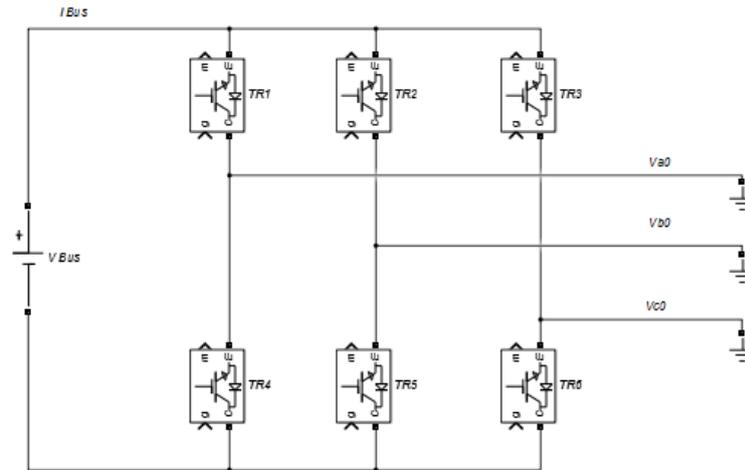


Figure 2.14 : Schéma électrique d'un onduleur de tension triphasé.

Les tensions simples aux bornes du moteur asynchrone se présentent de la manière suivante :

$$\begin{pmatrix} V_{a0} \\ V_{b0} \\ V_{c0} \end{pmatrix} = \frac{V_{BUS}}{3} \cdot \begin{pmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix} \quad (2.41)$$

Avec : S_1 , S_2 et S_3 sont des signaux de commande pour les trois interrupteurs de l'onduleur.

2.10.2. Modèles de convertisseurs DC/DC (Hacheurs)

Dans le système d'alimentation hybride, les convertisseurs DC/DC sont essentiels pour contrôler la puissance requise des sources d'énergie afin de s'adapter à la demande de puissance de la charge et de maintenir la tension du bus DC à la valeur souhaitée. Ces convertisseurs sont utilisés dans cette étude pour connecter les trois sources d'énergie PEMFC, BAT et SC avec un bus CC qui fournit de la tension et du courant à la charge de traction.

En fonction du rôle et de la fonction de chaque source d'énergie, les convertisseurs fonctionneront pour augmenter ou abaisser la tension fournie au bus CC via des mécanismes de décharge ou de charge. En détail, le convertisseur élévateur est utilisé pour convertir la tension inférieure du PEMFC en tension supérieure sur le bus CC, tandis que le convertisseur abaisseur-élévateur (convertisseur bidirectionnel) est utilisé pour transformer la tension

dans les deux sens entre batterie et le Bus DC, avec le mode boost pour la décharge et le mode buck pour la charge. La structure des convertisseurs DC/DC est décrite dans la figure 2.15.

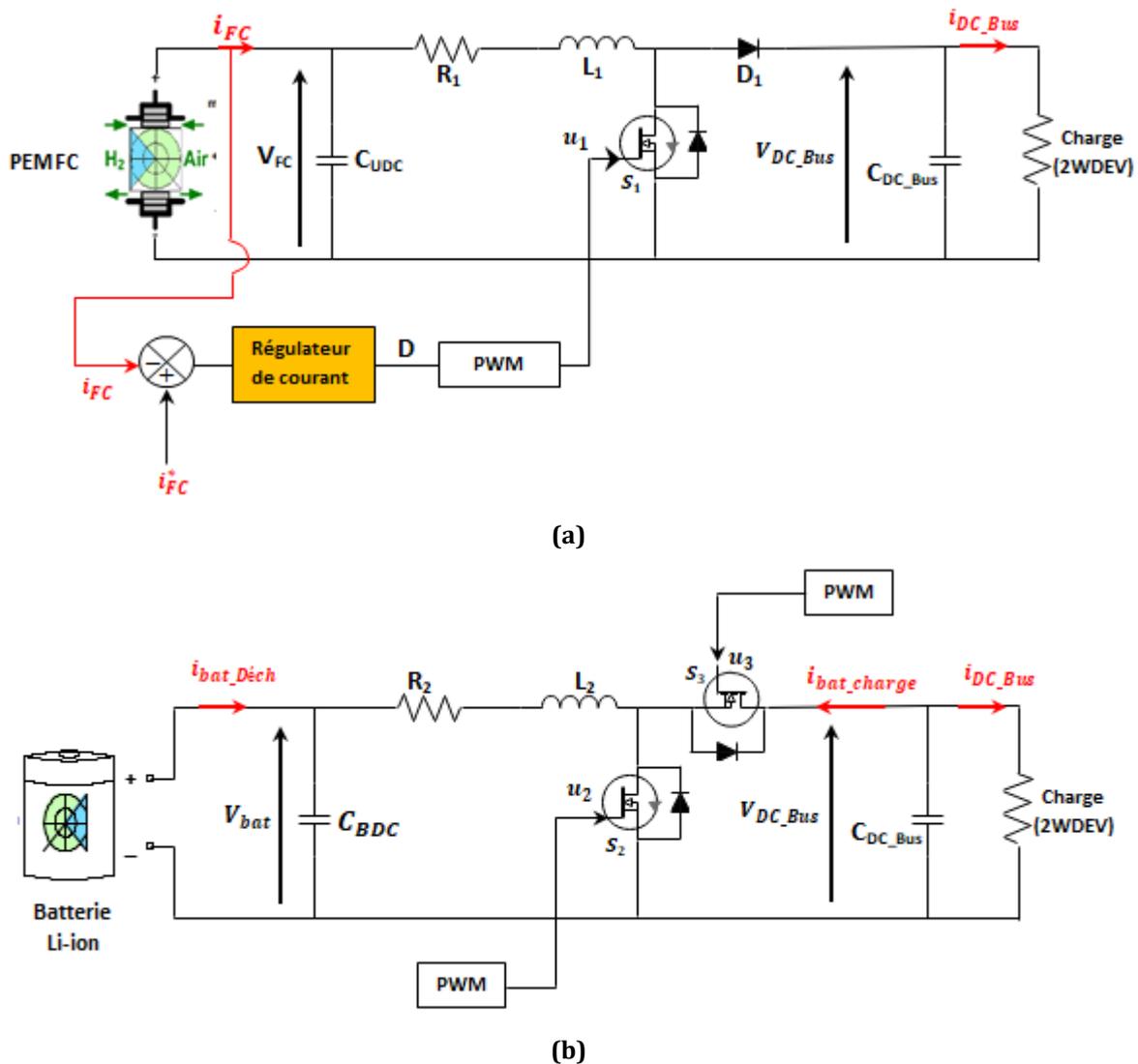


Figure 2.15: Structure of DC/DC converters. (a) Boost converter. (b) Buck-boost converter.

Dans la figure 2.15, le modèle de commutation est appliqué pour construire la structure des convertisseurs DC/DC. L'avantage de ce modèle est qu'il peut observer les actions de commutation, les harmoniques de commutation et les pertes des composants de commutation et étudier la dynamique du convertisseur.

Ce modèle est principalement utilisé pour des applications expérimentales et une boucle de contrôle adaptative est conçue pour générer les signaux PWM permettant de contrôler les composants de commutation. Ainsi, les cycles de service sont calculés pour définir les signaux PWM pour les convertisseurs DC/DC en fonction du courant de référence en mode buck ou en mode boost.

Lorsque le convertisseur Boost est en fonctionnement, le transistor de puissance dans la configuration illustrée dans la figure 2.15 (a) entre en commutation. Pendant cette phase, la pile à combustible génère de l'énergie qui alimente le bus continu.

Ce mode de fonctionnement est décrit par un modèle analytique basé sur un système d'équations différentielles, comme présenté dans l'équation (2.42). Le rapport cyclique D est défini comme étant égal à l'unité lorsque le transistor est conducteur et nul lorsqu'il est bloqué. Cela nous permet d'obtenir le modèle moyen du convertisseur survolteur, tel que représenté par l'équation (2.43). Les paramètres des composants électroniques utilisés dans le convertisseur PEMFC sont donnés dans le tableau 2.13.

$$\begin{cases} L_{fc} \cdot \frac{dI_{fc}}{dt} = V_{fc} - (1 - D) \cdot V_{DC_{Bus}} \\ C_{fc} \cdot \frac{dV_{DC_{Bus}}}{dt} = (1 - D) \cdot I_{fc} - I_{fc_{Bus}} \end{cases} \quad (2.42)$$

$$\begin{cases} \frac{dI_{fc}}{dt} = \frac{V_{fc}}{L_{fc}} - (1 - D) \cdot \frac{V_{DC_{Bus}}}{L_{fc}} \\ \frac{dV_{DC_{Bus}}}{dt} = (1 - D) \cdot \frac{I_{fc}}{C_{fc}} - \frac{I_{fc_{Bus}}}{C_{fc}} \end{cases} \quad (2.43)$$

Tableau 2.13 : Paramètres du convertisseur Boost pour PEMFC.

| L_{boost} (H) | C_{boost} (F) | C_{DC-Bus}(F) |
|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| 0.83e-3 | 2e-4 | 450e-6 |

2.10.2.1. Limites de tension et du courant du convertisseur unidirectionnel :

Le système de pile à combustible permet d'alimenter l'UDC à une puissance de 50 kW, avec une tension constante de haute tension de 400 V et un rendement de 0,88 à la puissance nominale. On peut trouver le courant maximum côté HV (haute tension) de l'UDC en mode de puissance de charge par l'équation (2.44).

$$I_{\max_UDC} = \frac{P_{fc} \times \eta_{UDC}}{V_{DC_Bus}} \quad (2.44)$$

$$I_{\max_UDC} = \frac{50000 \cdot 0.88}{400} = 110A$$

En mode UDC, le courant UDC côté HT reste constant à 110A, tandis qu'en mode de tension, la tension côté HT est maintenue à 400V.

Les modèles moyens des convertisseurs Buck et Boost sont similaires. Dans ce dispositif, le mode Buck correspond à la charge des batteries tandis que le mode Boost correspond à leur décharge, comme illustré dans la figure 2.15 (b). L'équation (2.44) présente le modèle moyen du convertisseur bidirectionnel en courant, où k et D_{Bat} varient en fonction du mode de fonctionnement. En mode Boost, $k = 1$ et le rapport cyclique est $(1 - D_{bat})$, tandis qu'en mode Buck, $k = -1$ et le rapport cyclique est D_{bat} . Ce modèle moyen présente un comportement non linéaire en raison du produit entre la variable de commande α_{bat} et les variables d'état (V_{DC_Bus} et I_{bat}). Les paramètres du convertisseur BAT sont donnés dans le tableau 2.14.

$$\begin{cases} L_{bat} \cdot \frac{dI_{bat}}{dt} = k \cdot (V_{bat} - D_{bat} \cdot V_{DC_Bus}) \\ C_{bat} \cdot \frac{dV_{DC_Bus}}{dt} = D_{Bat} \cdot I_{bat} - I_{bat_Bus} \end{cases} \quad (2.44)$$

Tableau 2.14 : Paramètres du convertisseur Buck-Boost pour batterie.

| L_{Buck-boost} (H) | C_{Buck} (F) | C_{Boost} (F) | R_{Buck} (ohm) | R_{Boost} (ohm) | C_{DC- Bus} (F) |
|-----------------------------------|-----------------------------|------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| 1.406250e-05 | 2.777778e-04 | 2.777778e-04 | 2.250000 | 4 | 187.5e -06 |

2.11. Puissance totale du véhicule

Dans ce travail, la puissance totale du véhicule comprend la puissance requise des deux moteurs et la puissance consommée par l'équipement auxiliaire du PEMFC et du véhicule :

$$P_{dem} = P_m + P_{aux} \quad (2.45)$$

Où P_{aux} est la puissance consommée par les équipements auxiliaires du FCS.

2.12. Conclusion

Dans ce deuxième chapitre, nous avons abordé dans un premier temps la chaîne de traction du véhicule électrique à deux roues motrices, qui sera la partie principale de notre étude. Ensuite, nous avons examiné la représentation dynamique du véhicule, en mettant en évidence la cinématique de braquage, qui est cruciale dans le système de traction pour garantir une meilleure maniabilité lors des virages. Puis, nous avons présenté les différentes forces qui agissent sur le véhicule, représentant le couple résistant à surmonter pour assurer son déplacement.

Concernant la partie sur la chaîne de traction, nous nous sommes concentrés sur la modélisation et le dimensionnement des différents composants qui la composent (motorisation, batterie, pile à combustible, supercondensateur, convertisseurs...), ainsi que sur les diverses formes et configurations utilisées pour interconnecter les sources d'énergie.

Enfin, en prenant en compte les différents profils de conduite, les structures et les configurations des systèmes et après avoir présenté le modèle global du véhicule, Le chapitre qui suit abordera la méthode de contrôle direct du couple de la machine asynchrone employée dans la chaîne de traction.

CHAPITRE 03

Commande directe du couple DTC de la machine asynchrone MAS

3.1. Introduction

Depuis une trentaine d'années, plusieurs stratégies de commande ont été développées pour pouvoir réaliser un contrôle découplé de la machine asynchrone. Ces méthodes appelées « commande vectorielle » assurant des performances dynamiques équivalentes à celles obtenues par la machine à courant continu. Ces méthodes présentent l'inconvénient majeur d'être relativement sensible aux variations des paramètres de la machine. Pour contourner ces problèmes, des nouvelles méthodes de contrôle ont été développées pour commander la machine asynchrone. La commande directe du couple (DTC), est basée sur l'orientation du flux statorique est l'une des méthodes introduites par *I. Takahashi* et *M. Depenbrock* en 1985 sous la terminologie DSC « *Direct Self Control* » [56], [57]. Cette commande est caractérisée par sa simplicité, sa haute performance et sa robustesse par rapport aux variations paramétriques. Le terme commande direct du couple vient du fait que sur la base des erreurs entre les valeurs de référence et celles estimées du couple et du flux statorique, il est possible de commander directement les états de l'onduleur. En utilisant des comparateurs à hystérésis.

Dans ce chapitre nous présenterons le principe de la commande directe du couple, ainsi, les résultats de simulation sont présentés pour illustrer les performances de cette commande.

3.2. Principe de la commande direct du couple DTC

La DTC a été introduite par *I. Takahashi* en 1985 à partir de la méthode du flux orienté et du principe du moteur à courant continu [58], [59]. Il a proposé de remplacer le découplage à travers la transformation vectorielle par un contrôle non linéaire tel que les états de commutation de l'onduleur soient imposés à travers un pilotage séparé du flux statorique et du couple électromagnétique du moteur. La DTC est basée sur la détermination directe de la séquence de commande appliqué à un onduleur de tension. Ce choix est généralement basé sur l'utilisation de régulateurs à hystérésis dont la fonction est de contrôler l'état du système, à savoir ici l'amplitude du flux statorique et le couple électromagnétique [60], [61]. L'état de ces grandeurs nous permettent de définir le vecteur tension statorique à appliquer à la machine asynchrone pour maintenir au mieux le couple et le flux dans leurs bandes d'hystérésis. Une variable intervenant également dans les choix des tensions et la position du vecteur statorique dans le plan

complexe (α, β) . Pour cela, le plan est divisé en six secteurs. La structure du contrôle direct du couple de base est résumée ci-dessous, Figure 3.1. Sur cette figure un onduleur de tension à deux niveaux est utilisé afin d'atteindre 7 positions distinctes dans le plan de phase. Correspondant aux huit vecteurs tensions de l'onduleur, parmi lesquels deux sont nuls. Ces vecteurs sont choisis à partir d'une table de commutation en fonction des erreurs du flux ($C\varphi_s$), du couple (CT_e) et de la position du vecteur flux statorique (θ_s) (où θ_s correspond à une discrétisation de l'angle du vecteur flux statorique, et identifie le secteur angulaire dans lequel se trouve ce vecteur). Les composants du vecteur flux statorique [62], sont déterminés par estimation en intégrant directement les tensions statoriques, par la suite le couple électromagnétique est estimé à partir des courants statoriques mesurés [62], [63]. L'erreur instantanée du couple est ensuite calculée et appliquée à un régulateur à hystérésis double bande, générant à sa sortie la variable (CT_e) à trois niveaux (-1, 0, 1), représentative du sens d'évolution temporelle souhaité pour le couple [64]. De même le module du vecteur flux statorique est calculé à partir des valeurs de ses coordonnées, et l'erreur de flux statorique injecté dans un régulateur à hystérésis de bande unique, générant à sa sortie la variable binaire ($C\varphi_s$) à deux niveaux (0, 1), représentative de l'évolution souhaitée pour le flux [64], [65], [66].

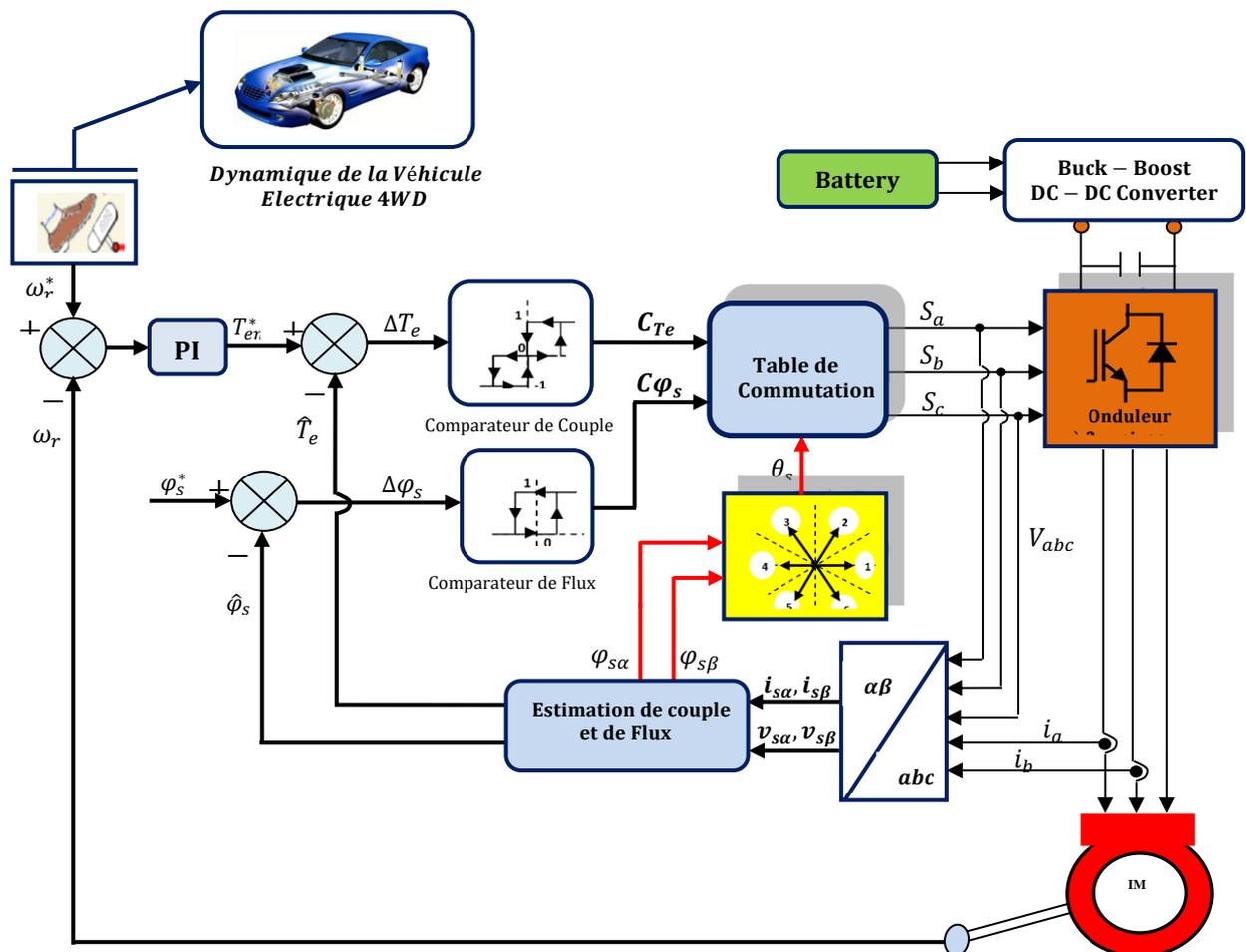


Figure 3.1: Schéma de la structure générale du contrôle direct du couple.

3.2.1. Contrôle du flux statorique de la machine

La commande directe du couple est basée sur l'orientation du flux statorique, l'expression du flux dans le référentiel lié au stator (α, β) de la machine est obtenue par l'équation suivante :

$$\bar{V}_s = R_s \bar{I}_s + \frac{d\bar{\varphi}_s}{dt} \quad (3.1)$$

On obtient :

$$\bar{\varphi}_s = \int_0^t (\bar{V}_s - R_s \bar{I}_s) dt \quad (3.2)$$

La chute de tension due à la résistance statorique peut être négligée (cas des vitesses élevées par exemple), l'équation (3.1) devient :

$$\frac{d\bar{\varphi}_s}{dt} \cong \bar{V}_s \quad (3.3)$$

Pour une période d'échantillonnage T_e la configuration de l'onduleur ne change pas, par conséquent le vecteur tension \bar{V}_s appliqué reste constant, donc l'équation (3.3) en discret peut s'écrire :

$$\bar{\varphi}_s(k+1) = \bar{\varphi}_s(k) + \bar{V}_s T_e \quad (3.4)$$

Avec :

$\bar{\varphi}_s(k+1)$: Vecteur du flux statorique à l'instant d'échantillonnage t_{k+1} .

$\bar{\varphi}_s(k)$: Vecteur du flux statorique à l'instant d'échantillonnage t_k .

T_e : Période d'échantillonnage.

L'équation (3.4) n'implique que l'extrémité du vecteur $\bar{\varphi}_s$ qui se déplace sur une droite dont la direction est donnée par le vecteur de la tension appliquée \bar{V}_s . La figure 3.2 montre un exemple d'application du vecteur \bar{V}_s .

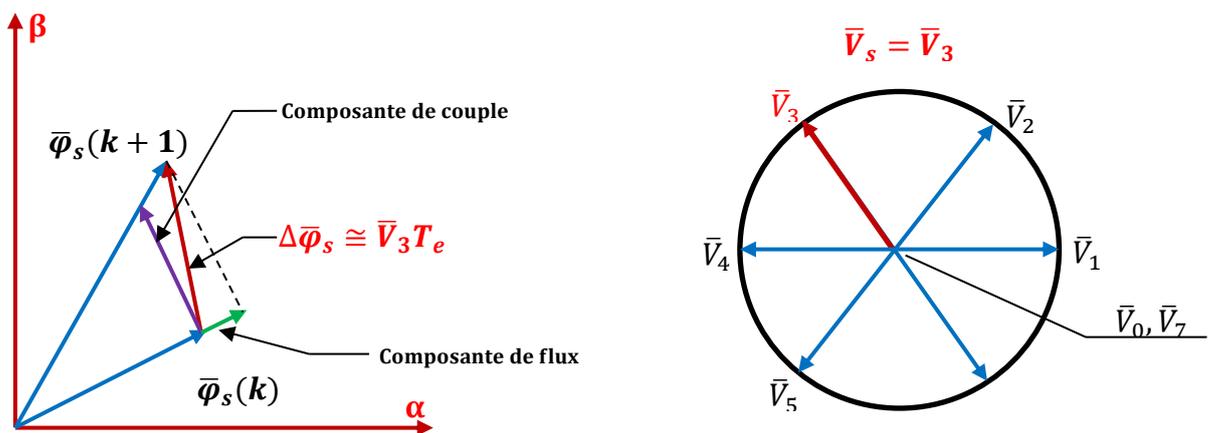


Figure 3.2: Evolution du vecteur flux pendant une période T_e .

En choisissant une séquence adéquate des vecteurs \bar{V}_s , sur les périodes de commande T_e , il est donc possible de fonctionner avec un module de flux $\bar{\varphi}_s$ pratiquement constant, en faisant suivre à l'extrémité de $\bar{\varphi}_s$ une trajectoire presque circulaire, si la période T_e est très faible devant la période de rotation du flux statorique. Lorsque le vecteur tension \bar{V}_s sélectionné est non nul, la direction du déplacement de l'extrémité de $\bar{\varphi}_s$ est donnée par sa dérivée $\frac{d\bar{\varphi}_s}{dt}$, cette dérivée représente aussi la vitesse de déplacement de $\bar{\varphi}_s$. La vitesse est maximale si le vecteur \bar{V}_s choisi est perpendiculaire à la direction de $\bar{\varphi}_s$.

3.2.2. Contrôle de couple électromagnétique de la machine

L'expression du couple électromagnétique dans le repère (α, β) lié au stator de la machine asynchrone s'écrit [67] :

$$T_{em} = P \frac{M}{\sigma L_s L_r} \text{Im}(\bar{\varphi}_s, \bar{\varphi}_r) \quad (3.5)$$

Les vecteurs flux statorique $\bar{\varphi}_s$ et flux rotorique $\bar{\varphi}_r$ peuvent être exprimés comme suit :

$$\begin{cases} \bar{\varphi}_s = \varphi_s e^{j\theta_s} \\ \bar{\varphi}_r = \varphi_r e^{j\theta_r} \end{cases} \quad (3.6)$$

Avec θ_s et θ_r sont respectivement les positions du flux statorique et rotorique $\bar{\varphi}_s$ et $\bar{\varphi}_r$ dans le repère (α, β) lié au stator comme montre la Figure 3.3.

En désignant par $\zeta = \theta_s - \theta_r$ l'angle entre les deux vecteurs flux (Figure 3.3), l'expression du couple devient :

$$T_{em} = P \frac{M}{\sigma L_s L_r} \varphi_s \varphi_r \sin(\zeta) \quad (3.7)$$

Où φ_s et φ_r sont respectivement les modules des flux statorique et rotorique

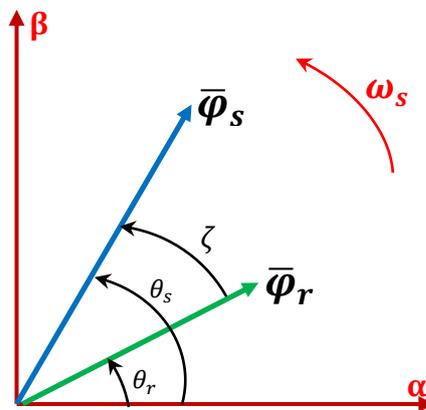


Figure 3.3: Position des vecteurs flux statorique $\bar{\varphi}_s$ et rotorique $\bar{\varphi}_r$.

D'après l'équation (3.7), on peut apercevoir que le couple dépend de l'amplitude des deux vecteurs $\bar{\varphi}_s$ et $\bar{\varphi}_r$ et de leur position relative.

A partir des équations des flux, le courant rotorique s'écrit :

$$\bar{I}_r = \frac{1}{\sigma} \left(\frac{\bar{\varphi}_r}{L_r} - \frac{M}{L_r L_s} \bar{\varphi}_s \right) \quad (3.8)$$

Et en utilisant les équations de la machine, exprimées dans le repère lié au rotor on trouve :

$$\frac{d\bar{\varphi}_r}{dt} + \frac{1}{\sigma T_r} \bar{\varphi}_r = \frac{M}{L_r L_s} \bar{\varphi}_s \quad (3.9)$$

L'équation (3.9) montre que le flux $\bar{\varphi}_r$ suit les variations de $\bar{\varphi}_s$ avec une constante de temps T_r . Le rotor agit comme un filtre de constante de temps σT_r entre les flux $\bar{\varphi}_s$ et $\bar{\varphi}_r$.

Si on suppose que la période d'échantillonnage T_e est telle que :

$$T_e \ll \sigma T_r \quad (3.10)$$

En appliquant un vecteur tension \bar{V}_s pendant une période d'échantillonnage T_e et en tenant compte de la condition (3.10), le flux rotorique $\bar{\varphi}_r$ continue à tourner avec la même vitesse en conservant presque la même amplitude, alors que le flux statorique tourne d'un angle $\Delta\zeta$ [67] avec :

$$\Delta\zeta = \Delta\omega_s T_e \quad (3.11)$$

L'expression du couple devient alors :

$$T_{em} = P \frac{M}{\sigma L_s L_r} \varphi_s \varphi_r \sin(\zeta + \Delta\zeta) \quad (3.12)$$

Cette relation montre que les variations du couple peuvent être contrôlées par $\Delta\zeta$ image de la vitesse de rotation du flux statorique. Deux cas se présentent :

$\Delta\zeta > 0$: $\bar{\varphi}_s$ Accélééré \Rightarrow le couple électromagnétique croît.

$\Delta\zeta < 0$: $\bar{\varphi}_s$ Décélééré \Rightarrow le couple électromagnétique décroît.

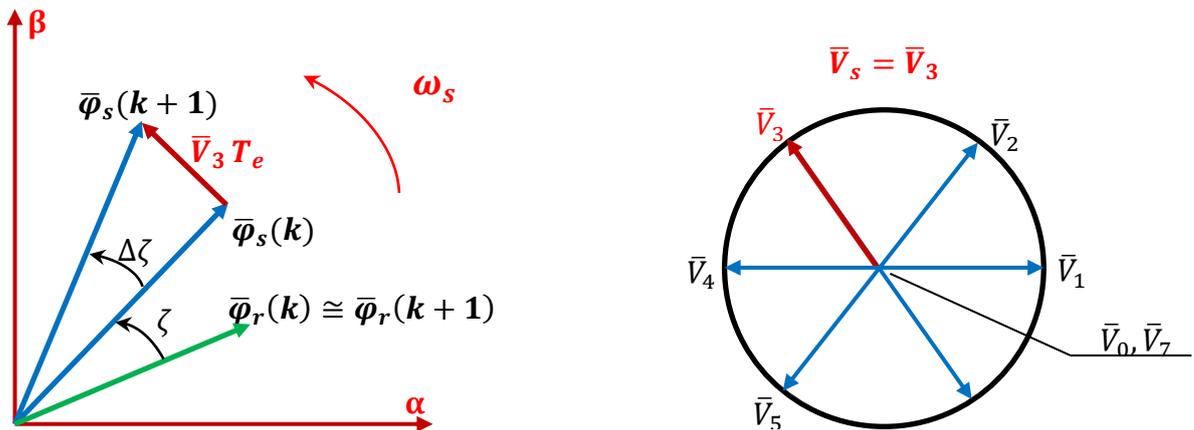


Figure 3.4: Exemple de l'évolution de l'angle ζ

3.2.3. Choix du vecteur tension

Pour fixer l'amplitude du vecteur flux statorique l'extrémité du vecteur flux doit dessiner une trajectoire circulaire. Pour cela le vecteur tension appliquée doit rester toujours perpendiculaire au vecteur flux. Ainsi en sélectionnant un vecteur approprié, l'extrémité du

flux peut être contrôlée de manière à maintenir l'amplitude du vecteur flux à l'intérieur d'une certaine fourchette.

Le choix de \bar{V}_s dépend de la variation souhaitée pour le module du flux mais également de l'évolution souhaitée pour sa vitesse de rotation et par conséquent pour le couple. On délimite généralement l'espace d'évolution de $\bar{\varphi}_s$ dans le référentiel fixe (α, β) lié au stator, en le décomposant en six zones (secteurs) de 60° symétriques par rapport aux directions des vecteurs tensions non-nuls. Comme le montre la Figure 3.5.

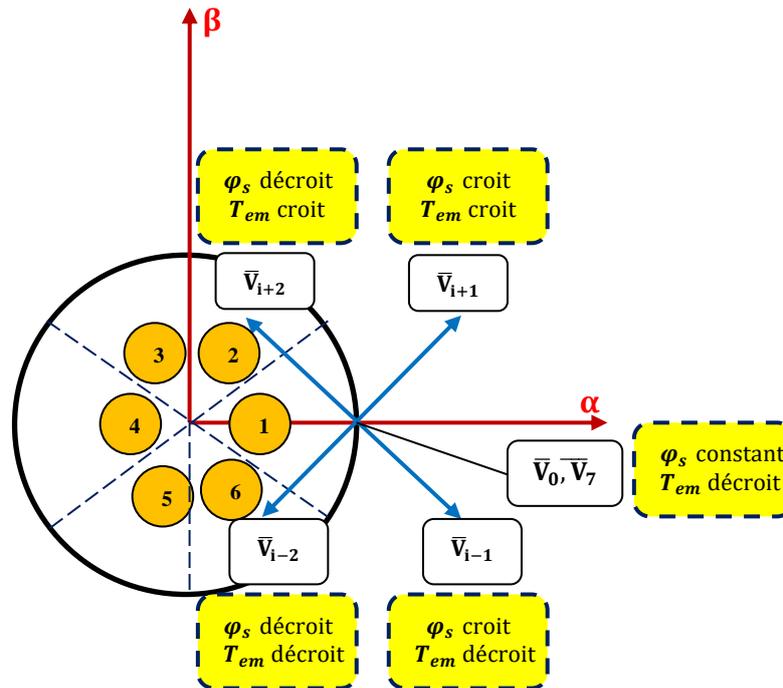


Figure 3.5: Choix du vecteur tension.

Lorsque le vecteur flux $\bar{\varphi}_s$ se trouve dans le secteur numéroté i , les deux vecteurs \bar{V}_i et \bar{V}_{i+3} ont la composante de flux la plus importante. En plus leur effet sur le couple dépend de la position du vecteur flux dans la zone. Le contrôle du flux et du couple peut être assuré en sélectionnant l'un des huit vecteurs tensions suivantes :

- Si \bar{V}_{i+1} est sélectionné alors $\bar{\varphi}_s$ croît et T_{em} croît.
- Si \bar{V}_{i-1} est sélectionné alors $\bar{\varphi}_s$ croît et T_{em} décroît.
- Si \bar{V}_{i+2} est sélectionné alors $\bar{\varphi}_s$ décroît et T_{em} croît.
- Si \bar{V}_{i-2} est sélectionné alors $\bar{\varphi}_s$ décroît et T_{em} décroît.
- Si le vecteur \bar{V}_0 ou \bar{V}_7 est choisi, le flux $\bar{\varphi}_s$ ne se déplace pas, d'où une décroissance du couple alors que le module du flux $\bar{\varphi}_s$ reste inchangé.

Le vecteur de tension sélectionné pour alimenter l'onduleur de la machine asynchrone est déduit selon des écarts du couple et du flux par rapport à leurs références, ainsi que la position du vecteur flux $\bar{\varphi}_s$. Un estimateur de flux $\bar{\varphi}_s$ en module et en position ainsi qu'un estimateur de couple sont donc nécessaires.

3.2.4. Estimateurs

3.2.4.1. Estimateurs du flux statorique

L'estimation du flux statorique se fait à partir de vecteur tension et courant statorique de la machine.

Dans le repère (α, β) lié au stator le vecteur flux statorique $\bar{\varphi}_s$ s'écrit :

$$\bar{\varphi}_s = \varphi_{s\alpha} + j\varphi_{s\beta} \quad (3.13)$$

A partir du système d'équation (3.13), les deux composantes α et β du vecteur flux $\bar{\varphi}_s$ s'écrivent :

$$\begin{cases} \varphi_{s\alpha} = \int_0^t (V_{s\alpha} - R_s i_{s\alpha}) dt \\ \varphi_{s\beta} = \int_0^t (V_{s\beta} - R_s i_{s\beta}) dt \end{cases} \quad (3.14)$$

On obtient les tensions composées $V_{s\alpha}$ et $V_{s\beta}$, de \bar{V}_s à partir de la tension d'entrée mesurée de l'onduleur U_{dc} , des états de commande (S_a, S_b, S_c) , et en utilisant la transformation de Concordia, on obtient :

$$\bar{V}_s = V_{s\alpha} + jV_{s\beta} \quad (3.15)$$

$$\begin{cases} V_{s\alpha} = \sqrt{\frac{2}{3}} V_{dc} \left(S_a - \frac{1}{2}(S_b - S_c) \right) \\ V_{s\beta} = \frac{1}{\sqrt{2}} V_{dc} (S_b - S_c) \end{cases} \quad (3.16)$$

Pour calculer les composantes $i_{s\alpha}$ et $i_{s\beta}$ du vecteur de courant statorique \bar{I}_s , nous utilisons la transformation de Concordia, à partir des courants mesurés (i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}) , soit :

$$\bar{I}_s = I_{s\alpha} + jI_{s\beta} \quad (3.17)$$

$$\begin{cases} I_{s\alpha} = \sqrt{\frac{2}{3}} i_{sa} \\ I_{s\beta} = \frac{1}{\sqrt{2}} V_{dc} (i_{sb} - i_{sc}) \end{cases} \quad (3.18)$$

Le module du flux statorique s'écrit :

$$\varphi_s = \sqrt{\varphi_{s\alpha}^2 + \varphi_{s\beta}^2} \quad (3.19)$$

Le secteur numéroté i dans le quel se situe le vecteur $\bar{\varphi}_s$ est déterminé à partir des composantes $\varphi_{s\alpha}$ et $\varphi_{s\beta}$.

L'angle θ_s entre le référentiel (α) et le vecteur $\bar{\varphi}_s$ est égale à :

$$\theta_s = \arctg \frac{\varphi_{s\beta}}{\varphi_{s\alpha}} \quad (3.20)$$

La détermination de la position de $\bar{\varphi}_s$ dans l'intervalle $[0 - 2\pi]$ est donné par le tableau 3.1.

Tableau 3.1: Position du vecteur flux statorique.

| | | θ_s |
|-------------------------|---------------------------|---|
| $\varphi_{s\alpha} > 0$ | $\varphi_{s\beta} > 0$ | $\arctg(\varphi_{s\beta}/\varphi_{s\alpha})$ |
| | $\varphi_{s\beta} < 0$ | $\arctg(\varphi_{s\beta}/\varphi_{s\alpha}) + 2\pi$ |
| $\varphi_{s\alpha} < 0$ | | $\arctg(\varphi_{s\beta}/\varphi_{s\alpha}) + \pi$ |
| $\varphi_{s\alpha} = 0$ | $\varphi_{s\beta} \geq 0$ | $\pi/2$ |
| | $\varphi_{s\beta} \leq 0$ | $3\pi/2$ |

3.2.4.2. Estimateurs du couple électromagnétique

Le couple électromagnétique peut être estimé à partir de l'estimation du flux et de la mesure du courant statorique :

$$T_{em} = \frac{3}{2}p(\varphi_{s\alpha}i_{s\beta} - \varphi_{s\beta}i_{s\alpha}) \quad (3.21)$$

3.2.5. Elaboration du vecteur de commande

3.2.5.1. Correcteur de flux

De manière à obtenir de très bonnes performances dynamiques, le choix d'un correcteur à hystérésis à deux niveaux semble être la solution la plus simple et la mieux adaptée à la commande étudiée. En effet, avec ce type de contrôle, on peut facilement contrôler et maintenir l'extrémité du vecteur flux $\bar{\varphi}_s$ dans une couronne circulaire comme le montre la figure 3.6 [68]. Pour cela un simple comparateur à hystérésis à deux niveaux est utilisé (Figure 3.6 (a)). La sortie du correcteur représentée par une variable booléenne ($C\varphi_s$), indique directement si l'amplitude du flux doit être augmenté ($C\varphi_s = 1$) ou diminuée ($C\varphi_s = 0$) de façon à maintenir :

$$|\varphi_s^* - \varphi_s| \leq \Delta\varphi_s \quad (3.22)$$

Avec :

φ_s^* : est le flux de référence.

$\Delta\varphi_s$: est la largeur d'hystérésis du correcteur.

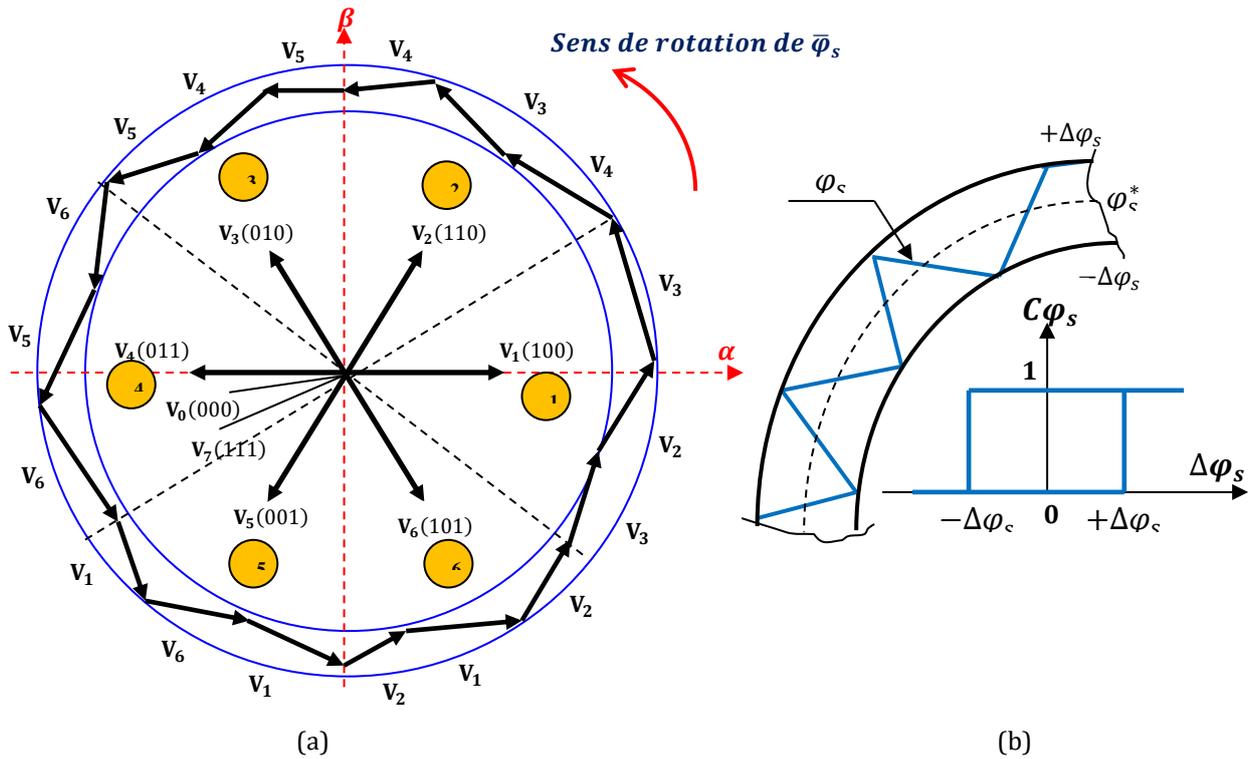


Figure 3.6: Sélection des tensions correspondant au contrôle du flux (a), Contrôleur à hystérésis à deux niveaux (b)

3.2.5.2. Correcteur de couple électromagnétique

On définit l'erreur sur le couple, noté ΔT_{em} , comme la différence entre le couple de référence et sa valeur estimée [69] :

$$\Delta T_{em} = |T_{em}^* - T_{em}| \quad (3.23)$$

Pour la correction du couple, on utilise aussi un comparateur à hystérésis qui a pour rôle de maintenir le couple dans les limites admissibles définies comme suit :

$$|T_{em}^* - T_{em}| \leq \Delta T_{em} \quad (3.24)$$

Avec :

T_{em}^* : est le couple de référence.

ΔT_{em} : est la largeur d'hystérésis du correcteur.

Cependant la différence avec le contrôle du flux et que le couple peut être positive ou négatif selon le sens de rotation de la machine. Deux solutions peuvent être envisagées (Figure 3.7) :

- Un correcteur à hystérésis à deux niveaux.
- Un correcteur à hystérésis à trois niveaux.

3.2.5.2.1. Correcteur du couple à deux niveaux

Le correcteur à deux niveaux est utilisé dans le cas du contrôle du couple dans un seul sens de rotation. Ainsi, seuls les vecteurs \bar{V}_{i+1} et \bar{V}_{i+2} et les vecteurs nuls peuvent être sélectionnés pour faire évoluer le vecteur flux. Le vecteur nul est sélectionné pour diminuer le couple. On peut choisir le vecteur tension nulle de manière à ce qu'un bras d'onduleur ne commute jamais quand le flux est situé dans une zone donnée.

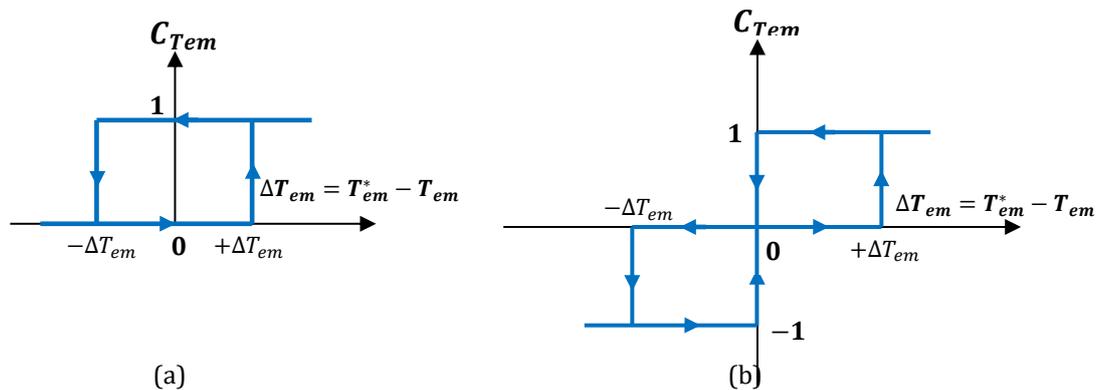


Figure 3.7: Correcteur à hystérésis du couple : (a) à deux niveaux, (b) à Trois niveaux.

3.2.5.2.2. Correcteur du couple à trois niveaux

Ce correcteur permet de contrôler la machine dans les deux sens de rotation, soit pour un couple positif ou négatif. La sortie du correcteur, présentée par la variable booléenne CT_{em} . Figure 3.8 (b) indique directement si l'amplitude du couple doit être augmentée en valeur absolue ($CT_{em} = 1$), pour une consigne positive et ($CT_{em} = -1$), pour une consigne négative, ou diminuée ($CT_{em} = 0$). En effet pour diminuer la valeur du couple, on applique les vecteurs \bar{V}_{i+1} et \bar{V}_{i-2} ce qui permet une décroissance du couple électromagnétique.

3.2.6. Elaboration de la table de commutation

L'onduleur de tension à deux niveaux alimentant la machine asynchrone est piloté par une loi de commande générée à partir d'une table de commutation. Cette dernière est construite en fonction des sorties des régulateurs à hystérésis CT_{em} et $C\varphi_s$, et du numéro de secteur où se trouve le flux statorique $\bar{\varphi}_s$, les vecteurs de tension sont choisis afin de maintenir le flux et le couple à l'intérieur des bandes d'hystérésis. La table de commutation définie par I. TAKAHASHI [70] est donnée par le Tableau 3.2.

Tableau 3.2: Table de commutation de la commande DTC.

| Numéro de secteur N | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | |
|---------------------|---------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-----------|
| Comparateur de flux | Comparateur de flux | | | | | | | |
| $C\varphi_s = 1$ | $CT_{em} = 1$ | \bar{V}_2 | \bar{V}_3 | \bar{V}_4 | \bar{V}_5 | \bar{V}_6 | \bar{V}_1 | 2 Niveaux |
| | $CT_{em} = 0$ | \bar{V}_7 | \bar{V}_0 | \bar{V}_7 | \bar{V}_0 | \bar{V}_7 | \bar{V}_0 | |
| | $CT_{em} = -1$ | \bar{V}_6 | \bar{V}_2 | \bar{V}_2 | \bar{V}_3 | \bar{V}_4 | \bar{V}_5 | 3 Niveaux |
| $C\varphi_s = 0$ | $CT_{em} = 1$ | \bar{V}_3 | \bar{V}_5 | \bar{V}_5 | \bar{V}_6 | \bar{V}_1 | \bar{V}_2 | 2 Niveaux |
| | $CT_{em} = 0$ | \bar{V}_0 | \bar{V}_0 | \bar{V}_0 | \bar{V}_7 | \bar{V}_0 | \bar{V}_7 | |
| | $CT_{em} = -1$ | \bar{V}_5 | \bar{V}_1 | \bar{V}_2 | \bar{V}_2 | \bar{V}_3 | \bar{V}_4 | 2 Niveaux |

3.2.7. Régulation de la vitesse de la machine asynchrone

La stratégie de commande directe du couple de la machine asynchrone avec référence du couple étudiée précédemment, n'est applicable que lorsque le couple de charge est en fonction de la vitesse rotorique. Cette dernière évolue en boucle ouverte. Dans le cas où l'application nécessite une régulation de vitesse, l'utilisation d'un régulateur de vitesse s'impose. Dans ce paragraphe nous intéresserons à la synthèse du régulateur de vitesse de type PI (proportionnel-intégral) pour la réalisation de notre stratégie de commande DTC avec boucle de vitesse.

Le couple électromagnétique est lié à la vitesse par l'équation différentielle suivante :

$$T_{em} = J_m \frac{d\omega_r}{dt} + f_c \omega_r + T_L \tag{3.25}$$

Le schéma bloc **simplifié** du système de contrôle de vitesse par régulateur PI est représenté par la figure 3.8 [58, 71].

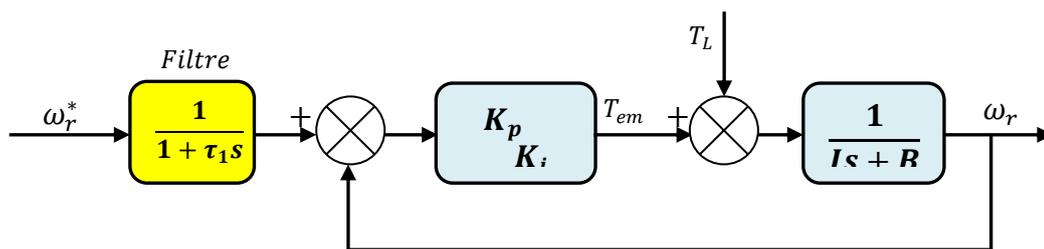


Figure 3.8: Schéma bloc de régulation de vitesse.

La fonction de transfert en boucle ouverte $G(s)$ liant la vitesse de rotation et le couple électromagnétique avec un couple de charge nul est donnée par :

$$G(s) = K_{iv} \frac{(\tau s + 1)}{s(J_m s + B)} \quad \text{Avec } B = \frac{f_c}{J_m}, \tau = \frac{K_{pv}}{K_{iv}} \tag{3.26}$$

La fonction de transfert en boucle fermée est :

$$H(s) = \frac{G(s)}{1+G(s)} = K_{iv} \frac{(\tau s + 1)}{J_m s^2 + (B + K_{iv} \tau) s + K_{iv}} \quad (3.27)$$

$$= \frac{(\tau s + 1)}{\frac{J_m}{K_{iv}} s^2 + \tau s + 1} \quad \text{Avec } B \approx 0$$

Par identification avec l'équation caractéristique de second ordre fondamental, on trouve :

$$\begin{cases} \omega_n^2 = \frac{J_m}{K_{iv}} \\ 2\xi\omega_n = \tau \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} K_{iv} = \frac{4\xi^2 J_m}{\tau} \\ K_{pv} = K_{iv} \omega_n \end{cases} \quad (3.28)$$

3.2.8. Caractéristiques générales d'une DTC [68]

- La DTC est basée sur la sélection des vecteurs optimaux de commutation de l'onduleur.
- La commande indirecte des intensités et tensions statorique proches des formes sinusoïdales.
- L'obtention des flux et des courants statoriques proches des formes sinusoïdales.
- La réponse dynamique du couple de la machine est très rapide.
- L'existence des oscillations de couple qui dépend de la largeur des bandes des comparateurs à hystérésis.
- La fréquence de commutation de l'onduleur dépend de l'amplitude des bandes d'hystérésis.

3.2.9. Avantages de la DTC [68]

- Il n'est pas nécessaire de faire la transformation des coordonnées, car les courants et les tensions sont dans un repère lié au stator.
- Il n'existe pas de bloc qui calcule la modulation de la tension (MLI).
- Il n'est pas nécessaire de faire un découplage des courants par rapport aux tensions de commande, comme dans le cas de la commande vectorielle.
- Elle exige deux comparateurs à hystérésis et un contrôleur de vitesse du type PI, tandis que dans la commande vectorielle exige deux régulateurs PI et un modulateur de PWM.
- Il n'est pas nécessaire de connaître avec une grande précision l'angle de position rotorique, car seule l'information de secteur dans lequel se trouve le vecteur de flux statorique est nécessaire.
- La réponse dynamique du couple est très rapide.
- Robustesse vis-à-vis des variations paramétriques.

3.2.10 Inconvénients de la DTC [68]

- L'existence de problèmes à basse vitesse (influence du terme résistif).
- La nécessité de disposer des estimations de flux statorique et du couple.
- L'existence des oscillations de couple.
- La fréquence de commutation n'est pas constante (utilisation des régulateurs à hystérésis), ce qui conduit à un contenu riche en harmoniques, ce qui augmente les pertes et amener à des bruits acoustiques et des oscillations de couple pouvant exciter des résonances mécaniques.

Cependant, la DTC est une commande qui est basée sur l'estimation du flux statorique et du couple électromagnétique. Seule la variation de la résistance du stator, due aux changements de la température ou le fonctionnement à des vitesses de rotation petites dégrade les performances de la commande DTC [65].

3.3. Résultats de simulation

Le comportement de la structure de la commande directe du couple DTC, appliqué à une machine asynchrone de 37Kw (dont les paramètres sont définis en annexe (Tableau.01)) alimenté par un onduleur de tension triphasé, en présence de la boucle de réglage de la vitesse par un correcteur PI, en utilisant le schéma bloc de la (Figure 3.1), est simulé sous l'environnement Matlab/Simulink.

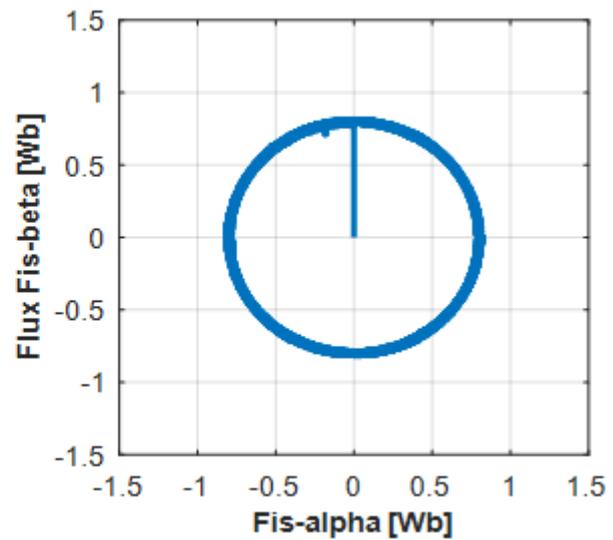
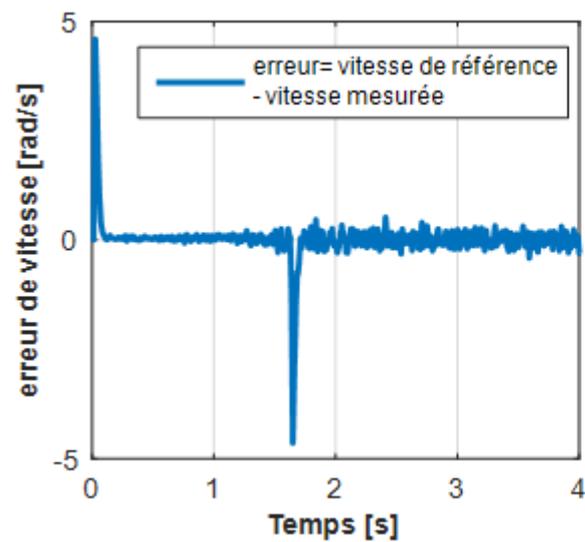
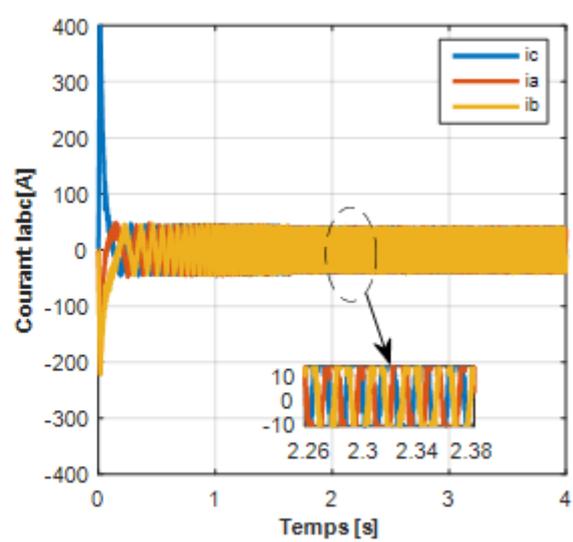
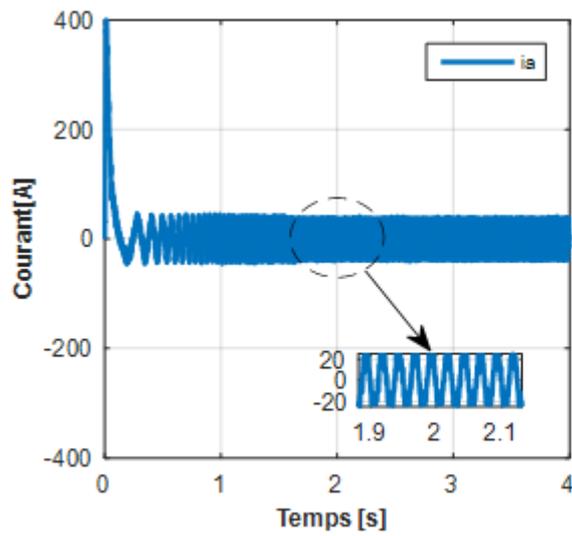
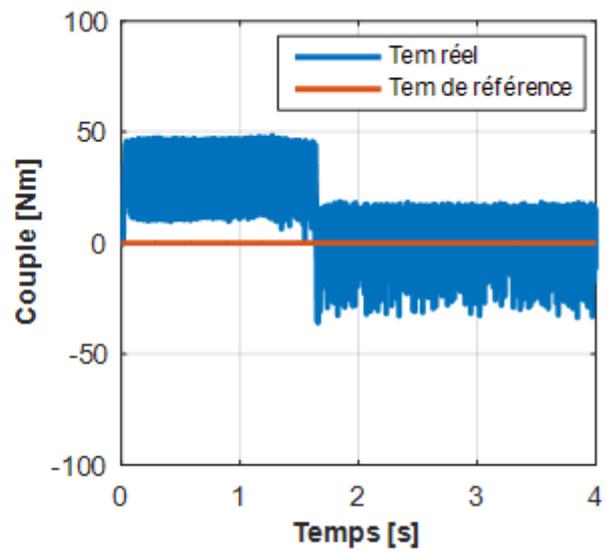
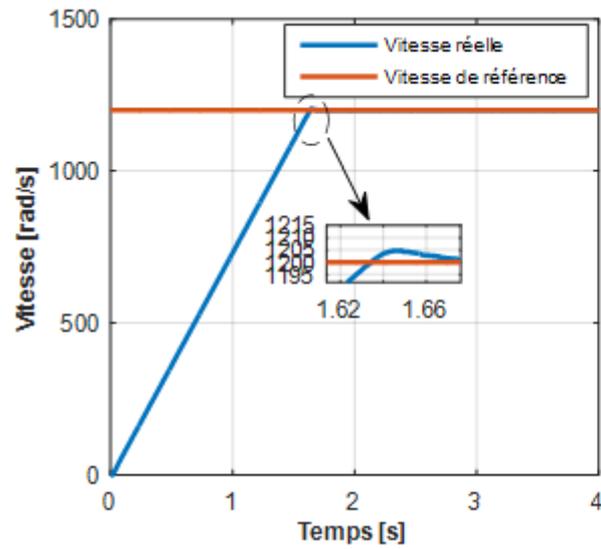
La simulation est effectuée dans les conditions suivantes :

- ✓ Une bande d'hystérésis de $\pm 0.02Wb$ pour le flux et de $\pm 5Nm$ pour le couple.
- ✓ Un flux statorique de référence de $0.8Wb$.
- ✓ La période d'échantillonnage est de $2\mu s$.

Les performances de notre commande ont été testées à partir de la simulation des modes de fonctionnements suivante : un démarrage à vide puis une application d'un couple de charge, une inversion de sens de rotation, fonctionnement à basse vitesse, la robustesse de la commande vis-à-vis la variation de résistance statorique.

3.3.1. Test de démarrage à vide

Afin de vérifier le comportement du moteur en l'absence de charge, et d'analyser l'efficacité de la commande DTC en termes de contrôle du flux et du couple, nous avons simulé le fonctionnement d'un moteur asynchrone à vide, avec une vitesse de référence de 1200 tr/min.



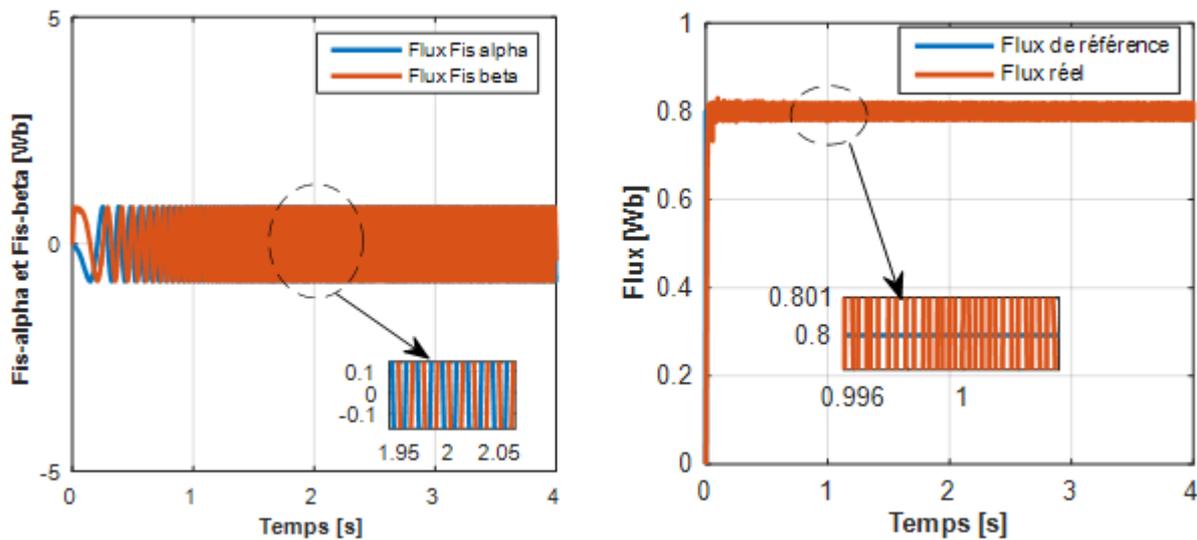


Figure 3.9: Résultats de simulation de la DTC à vide.

Les différentes grandeurs telles que le courant statorique, la vitesse, le couple électromagnétique, le flux statorique, le module du flux, l'erreur de vitesse et la trajectoire du flux statorique sont illustrées dans la figure 3.9.

Les résultats de la simulation illustrés dans cette figure montrent que la vitesse au démarrage augmente sans dépassement puis atteint la vitesse de référence de 1200 tr/min en 1.6s . Ce qui indique que le DTC offre une performance dynamique satisfaisante sans dépassement. L'erreur de vitesse est significative au démarrage et varie autour de zéro lorsque la vitesse suit la consigne.

La réponse de courant statorique présente une allure sinusoïdale bruitée et est caractérisée par une forte amplitude au démarrage allant jusqu'à 400A , puis il se stabilise à sa valeur nominale. La même observation est valable pour les éléments des courants statoriques qui ont des formes sinusoïdales.

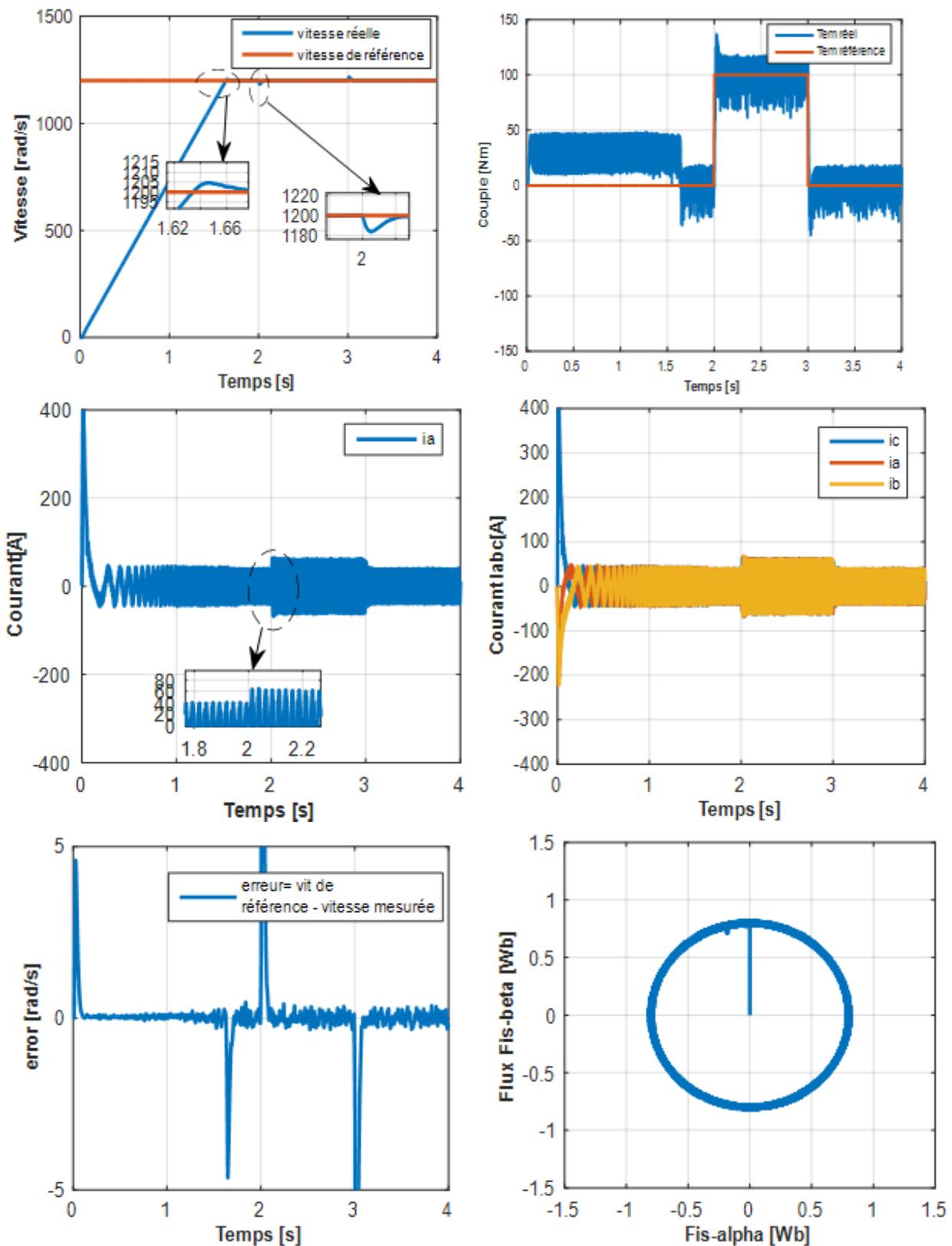
La réponse de flux statorique illustré dans la Figure 3.9 atteint immédiatement sa valeur de référence de 0.8Wb . La trajectoire du flux statorique est pratiquement circulaire.

3.3.2. Test de démarrage à vide suivi d'une application du couple de charge

Pour mettre en évidence les performances statique et dynamique de la commande DTC, nous avons simulé les régimes transitoires suivants : démarrage à vide avec une vitesse de consigne de 1200 tr/min , puis appliquer un couple de charge $T_L = 100\text{Nm}$ à l'instant $t = 2\text{s}$ on cesse l'application à l'instant $t = 3\text{s}$ respectivement. La figure 3.10 montre les résultats de simulation concernant les réponses de la vitesse, du couple, du courant et du flux statorique ainsi la trajectoire du flux.

De ces courbes, on peut noter que la vitesse réelle ω_r du moteur converge vers sa valeur de référence ω_r^* avec un temps de réponse faible de l'ordre de 1.6s avec un dépassement de 0.41% et sans erreur statique. Lorsqu'on applique le couple de charge à $t = 2\text{s}$ on peut voir

un sous-dépassement de vitesse d'environ 20 rad/s de la vitesse de référence qui rejoint par la suite la valeur de référence. L'erreur de vitesse est significative au démarrage et lors de l'application du couple de charge.



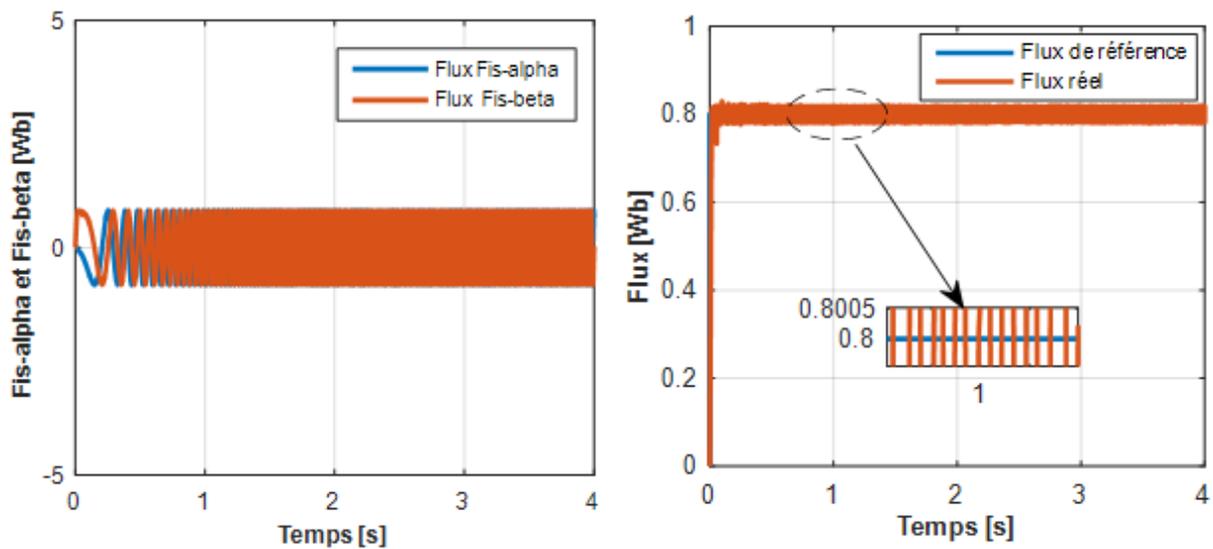
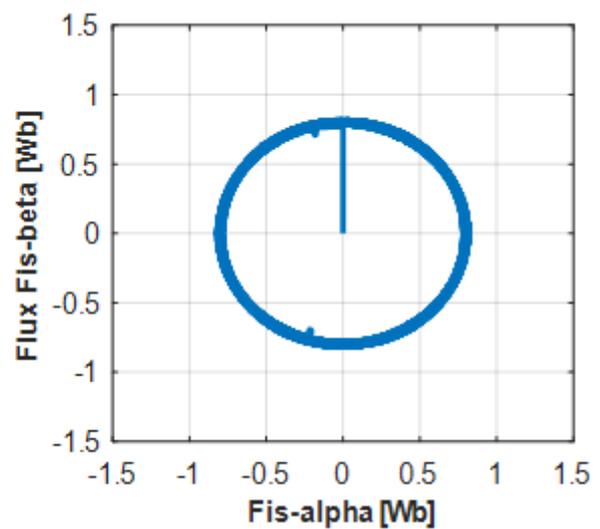
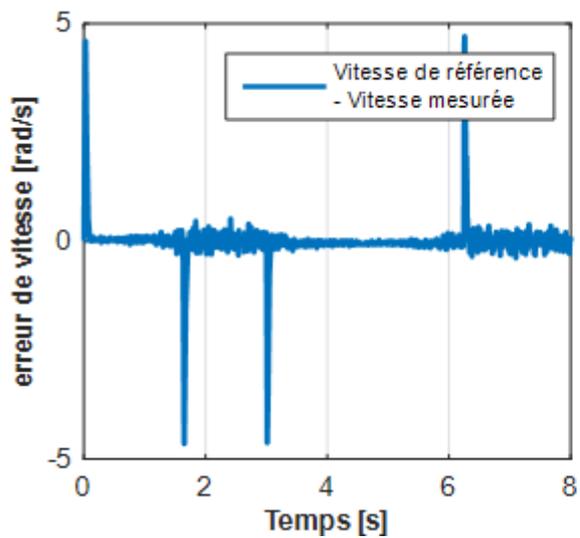
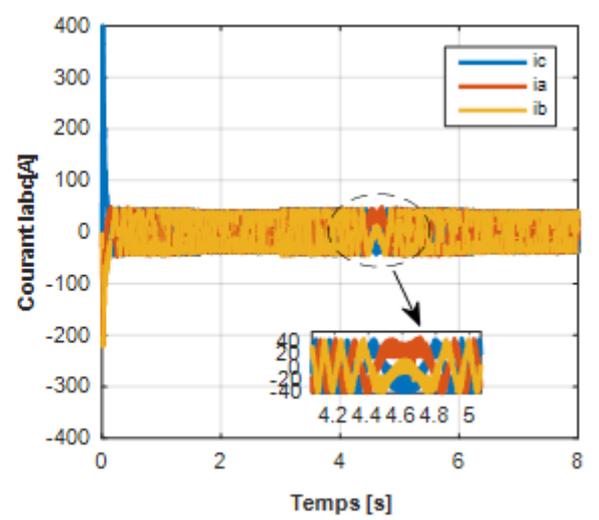
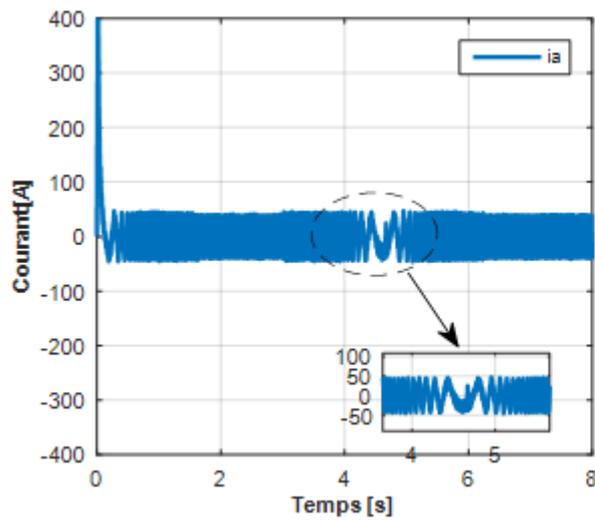
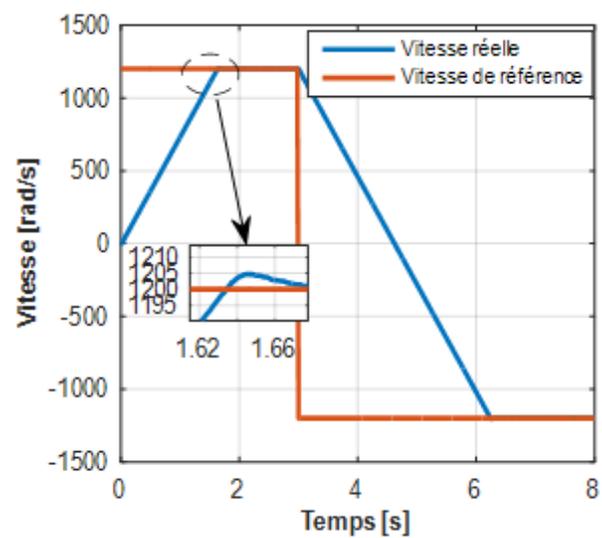
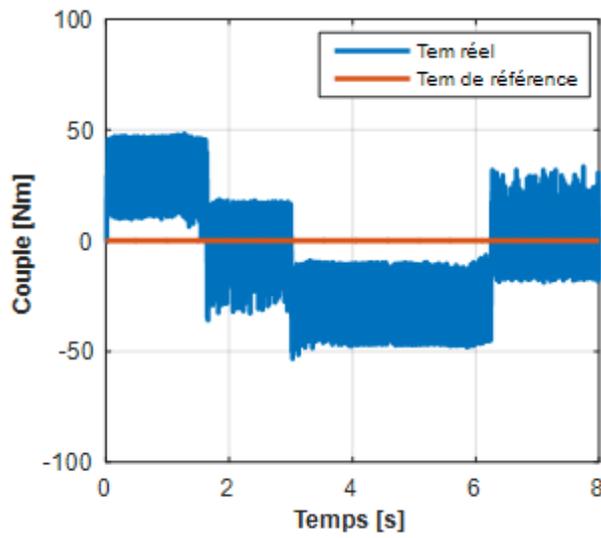


Figure 3.10: Résultats de simulation de la DTC lors du démarrage à vide suivi d'une application d'un couple de charge.

On observe aussi sur la même figure, la réponse de couple électromagnétique T_{em} suit parfaitement la valeur de couple de charge imposée, et présente un régime transitoire rapide et des oscillations importantes au niveau de son amplitude autour de sa valeur de référence. Ceci constitue un inconvénient majeur de la commande DTC. La réponse du courant statorique est caractérisée par une allure sinusoïdale bruitée, avec une amplitude élevée au démarrage allant jusqu'à 400A, puis des ondulations importantes à l'instant $t=2s$ suite à l'application du couple de charge. La réponse de flux statorique illustré dans la figure 3.10 atteint immédiatement sa valeur de référence de $0.8Wb$. En outre, les deux flux statoriques α et β fluctuent autour de la valeur de $\pm 0.8Wb$, et la trajectoire du flux statorique est pratiquement circulaire.

3.3.3. Test d'inversion de la vitesse

Afin de tester la robustesse de la commande DTC pour la MAS, vis-à-vis de la variation de la référence de la vitesse, on introduit un changement de consigne de vitesse de 1200 tr/min à -1200 tr/min à l'instant $t = 3s$.



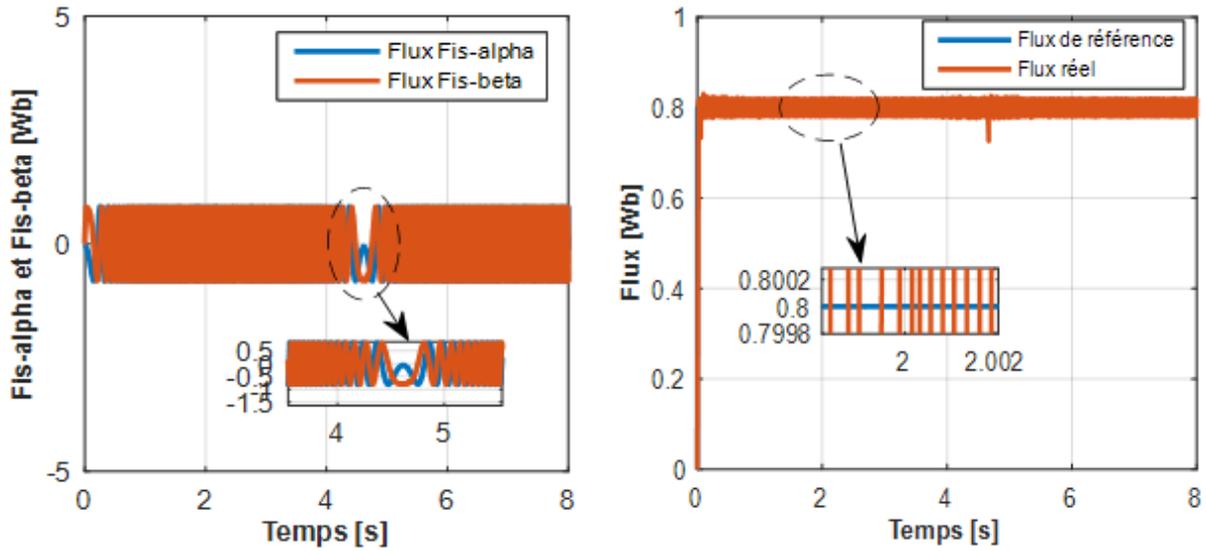


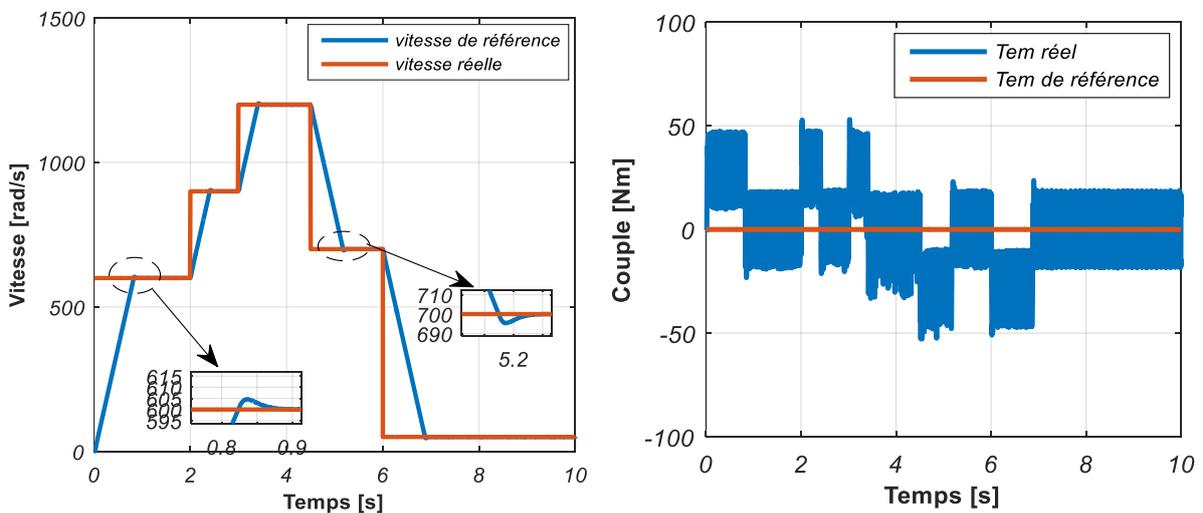
Figure 3.11: Résultats de simulation de la DTC lors de l'inversion de sens de rotation.

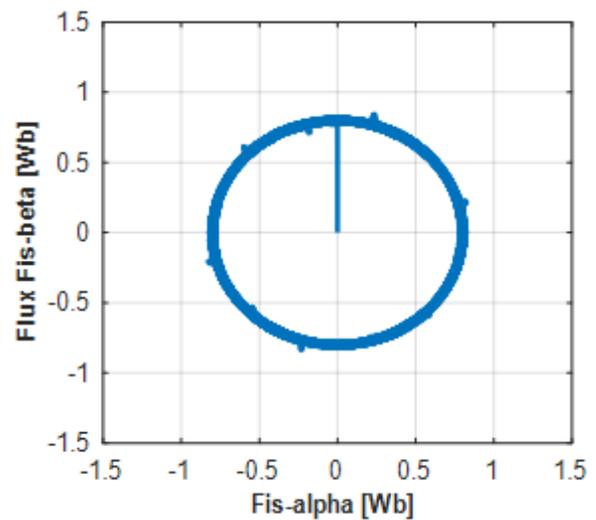
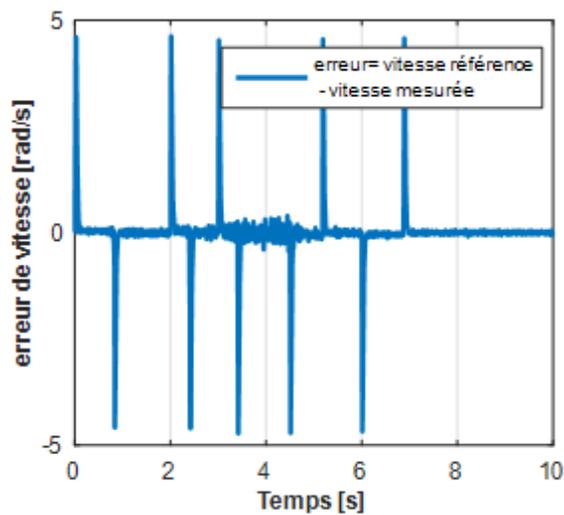
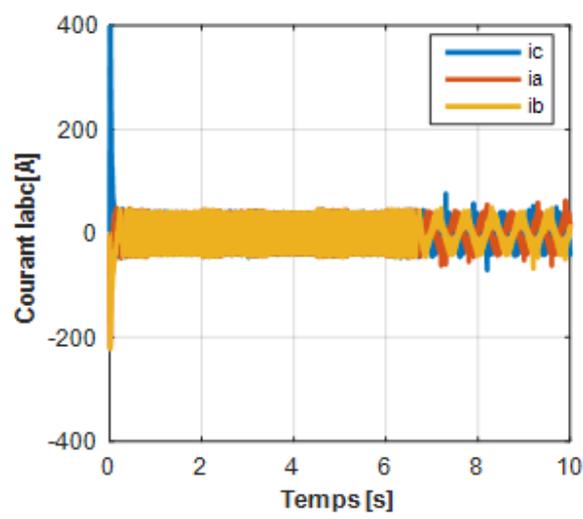
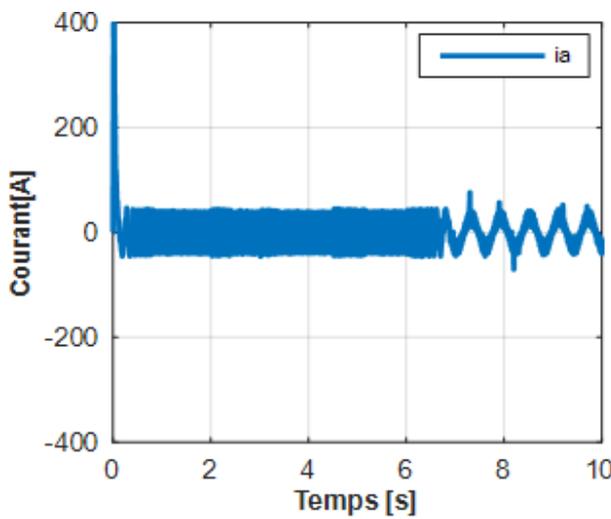
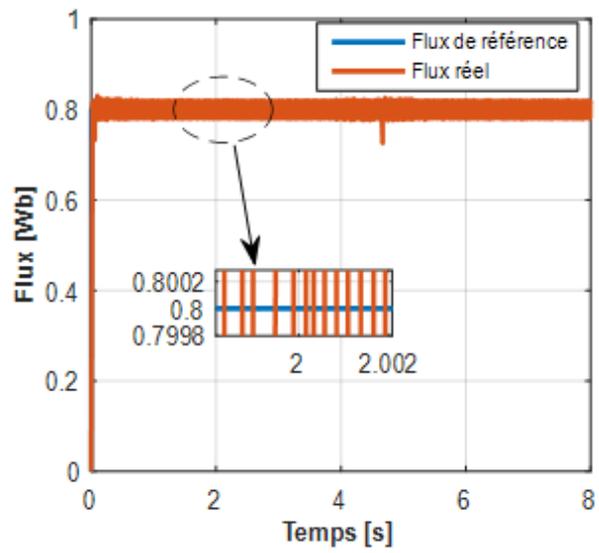
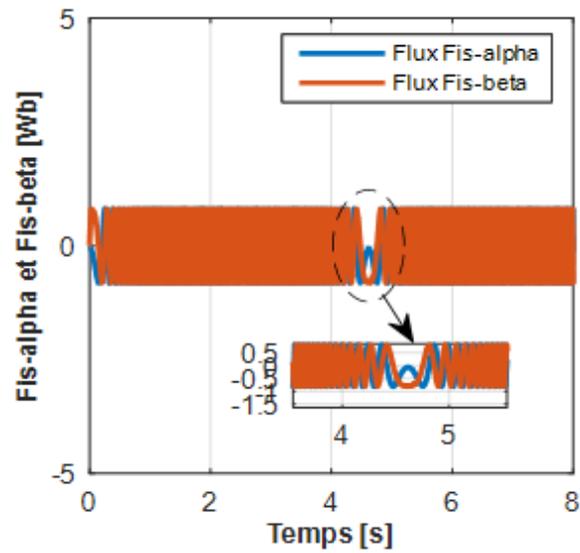
Selon les résultats présentés dans la Figure 3.11, il est évident que la vitesse suit sa consigne avec un temps de réponse pratiquement identique et avec un dépassement de 0.41%.

L'allure du couple et des courants statoriques présente des pics lors de l'inversion de la vitesse avant de se stabiliser à la valeur désirée. Au moment de l'inversion de la vitesse, on constate aussi une variation négligeable au niveau de module du flux statorique.

3.3.4. Test changement de la vitesse

Afin d'illustrer l'efficacité de la DTC, une consigne de vitesse très faible a été mise en place, avec des variations de la valeur de la vitesse [600-900-1200-700-50] tr/min à l'instant $t = [0 \ 2 \ 3 \ 4.5 \ 6] \text{ s}$.





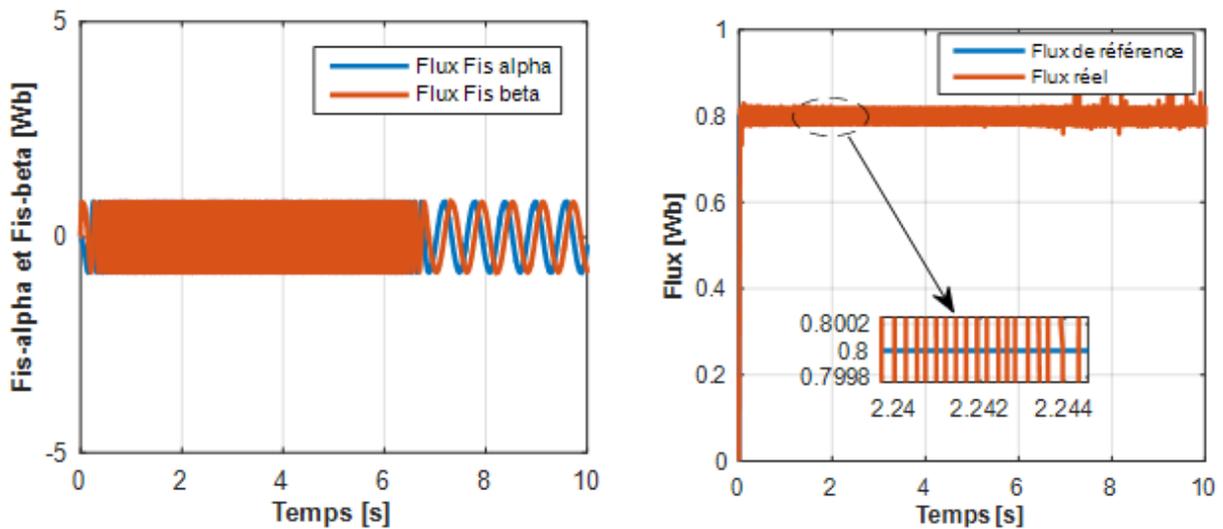


Figure 3.12: Résultats de simulation de la DTC à changement de la vitesse.

Les résultats de cette phase de simulation sont illustrés dans la figure 3.12. Pendant un fonctionnement à faible vitesse, il est observé que la vitesse suit parfaitement sa référence, ainsi les courants statoriques sont influencés par la variation de vitesse. Le module du flux est généralement maintenu de la valeur de référence 0.8Wb, indépendamment du changement de vitesse, tandis que les flux statoriques α et β augmentent à basse vitesse. Le flux statorique a une trajectoire presque circulaire.

3.3.5. Test de variation de la résistance statorique

L'un des principaux désavantages de la commande DTC est l'effet des variations de la résistance des enroulements statoriques, en particulier en raison des variations de température. Ces variations de résistance peuvent entraîner des dysfonctionnements dans la sélection du vecteur de tension à appliquer.

Pour étudier l'influence de la résistance statorique R_s sur le comportement de la machine asynchrone lors de la variation des paramètres électriques, nous avons également simulé le système pour une valeur de 1.5 de R_s nominale à l'instant $t = 3s$.

La figure 3.13 illustre l'évolution de la vitesse, du couple, de courant statorique, du module de flux et la trajectoire du flux statorique. Ces courbes, montrent une grande perturbation et une divergence dans l'intervalle de temps où la résistance de stator est au-dessus de sa valeur nominale, Ainsi la déformation de la trajectoire d'extrémité du flux. L'analyse de cette variation excessive vise à mettre en lumière les problèmes indésirables susceptibles d'affecter la commande et de compromettre les performances de la DTC.

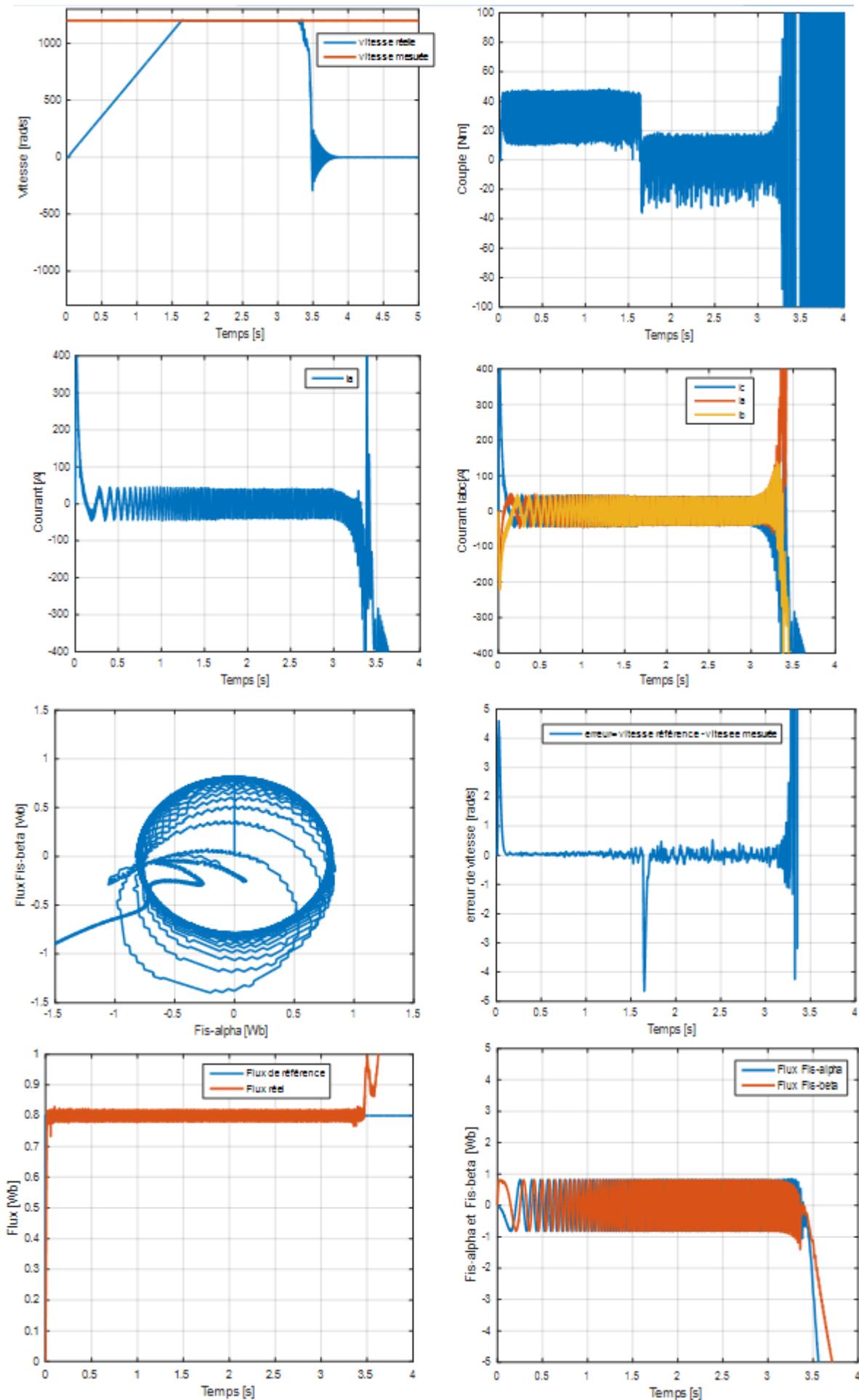


Figure 3.13: Représentation de la variation de la résistance statorique.

3.4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la structure de la commande directe du couple (DTC), cette méthode apporte donc une solution concrète aux problèmes de robustesse rencontrée dans les autres structures de contrôle telle que la commande vectorielle à orientation du flux rotorique.

Cette stratégie de commande est insensible aux variations des paramètres statoriques de la machine, l'estimation de flux ne dépend que de la résistance du stator. En outre, la fréquence de commutation est variable et difficile à maîtriser du fait de l'utilisation des contrôleurs à hystérésis, ses derniers engendrent des fluctuations au niveau du couple électromagnétique et du flux statorique qui peuvent provoquer des bruits et par la suite un vieillissement de la machine.

CHAPITRE 04

Résultats de simulation du véhicule électrique à deux roues motrices et algorithme de gestion d'énergie hybride

4.1. Introduction

Dans le deuxième chapitre de notre étude, nous avons exploré en détail le dimensionnement des sources d'énergie électrique ainsi que les contrôles des différents convertisseurs de puissance utilisés dans les systèmes multi-sources envisagés. L'objectif de cette section du mémoire est de valider par simulation une stratégie ou un algorithme de gestion de l'énergie dans un véhicule électrique hybride. Donc, ce chapitre se concentrera sur l'étude des diverses stratégies de gestion d'énergie, en mettant l'accent sur le principe de la stratégie basée sur le contrôle PI classique. Nous examinerons aussi les conclusions des simulations effectuées avec Matlab/Simulink, en mettant l'accent sur le type de système étudié, à savoir le système à trois sources, avec une pile à combustible, des batteries et un supercondensateur. En analysant ces résultats, nous pourrions évaluer l'efficacité et la robustesse de notre approche de gestion d'énergie dans un contexte pratique, ce qui constitue une étape cruciale dans le processus de développement et de validation de systèmes énergétiques complexes et polyvalents.

4.2. Différentes stratégies de gestion d'énergie

Les algorithmes ou stratégies de gestion de l'énergie les plus couramment utilisées dans les applications des véhicules électriques hybride peuvent être classés de la façon suivante [72] :

- ✚ **Stratégie de contrôle PI classique** (Thounthong et al. 2011) : L'objectif de cette stratégie est de réduire au minimum les fluctuations indésirables de la consommation d'énergie tout en garantissant une réponse rapide aux variations de charge. Elle permet également de garantir la stabilité du système et d'optimiser la performance énergétique.
- ✚ **Stratégie de découplage de fréquence et de logique floue** (Atesetal. 2010, Erdincetal. 2009, Vural et al. 2010) : Cette stratégie permet de répondre de manière adaptative aux fluctuations de la demande et aux contraintes opérationnelles, et en permettant une gestion

flexible et adaptative des ressources. En utilisant le découplage de fréquence et la logique floue, cette stratégie permet d'optimiser les paramètres de fonctionnement des systèmes en temps réel pour atteindre les objectifs fixés.

✚ **Stratégie de minimisation de la consommation équivalente (ECMS)** (García et al. 2012, Torreglosa et al. 2011, Rodatz et al. 2005) On peut la définir comme une approche qui cherche à diminuer la consommation équivalente, c'est-à-dire la consommation de ressources d'un système par unité de production ou d'activité équivalente, sans compromettre la qualité ou la productivité.

✚ **Programmation dynamique 2D (2DDP) et principe minimal de Pontryagin 2D et le Principe minimal de Pontryagin (2DPMP)** (Jiang et al. 2019) (fuel cell, battery and capacitor) [73] : La programmation dynamique est utilisée pour optimiser le dimensionnement des sources d'énergie et le principe minimal de Pontryagin est utilisé pour la stratégie de gestion de l'énergie. Le dimensionnement et la gestion sont effectués simultanément augmentation de la durabilité et réduction de la consommation d'énergie.

✚ **Contrôle par mode glissant (Sliding Mode Control)** (Dinh et al. 2019) (Suivi de la vitesse de la voiture, des courants, et augmentation de la durée de vie de la batterie) [73] : elle présente plusieurs avantages notamment l'invariance par rapport aux perturbations et aux incertitudes du modèle, la capacité à gérer de grandes non-linéarités et la robustesse.

4.3. Stratégie de contrôle de la gestion de l'énergie

Dans le domaine de la gestion d'énergie, les systèmes de gestion de l'énergie (EMS) jouent un rôle crucial dans l'optimisation des performances et de l'efficacité des systèmes énergétiques complexes. Récemment, de nouveaux EMS (Energy Management Systems) basés sur des contrôleurs PI et PID, sont recommandés pour leur simplicité et leur ajustabilité aux missions spécifiques. L'EMS par PI vise à maintenir l'état de charge SOC de la batterie entre ses états maximal et minimal pour prolonger sa durée de vie. Dans cette étude le contrôleur PI a été mis en place pour maintenir le SOC de la batterie à un niveau stabilisé, avec la valeur souhaitée fixée à 60 %. L'écart du SOC réel par rapport à cette valeur définie a été utilisé comme une base pour calculer la puissance référence de sortie de pile à combustible PEMFC. En adoptant cette approche plus avancée, les EMS basés sur des contrôleurs PI offrent la possibilité d'optimiser davantage les performances des systèmes énergétiques, en prenant en compte les caractéristiques spécifiques de chaque composant et en adaptant dynamiquement leur comportement pour atteindre les objectifs de performance et d'efficacité énergétique [74]. La figure 4.1 montre l'organigramme de la procédure de gestion d'énergie (EMS).

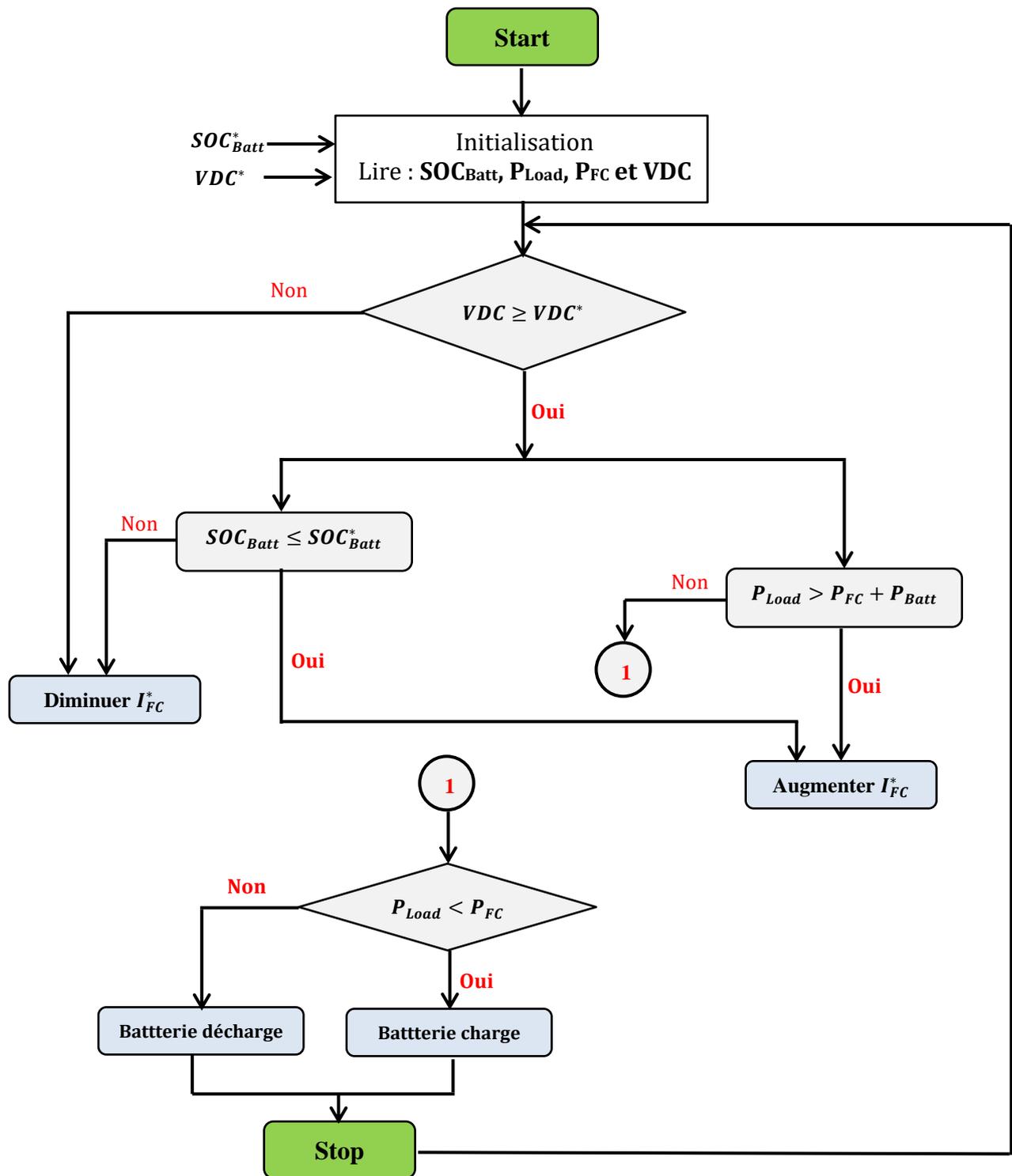


Figure 4.1: Organigramme de la gestion de l'énergie.

4.4. Description du système global de gestion d'énergie hybride pour VE2WD.

Dans cette étude, la stratégie de contrôle proposée est conçue pour déterminer la distribution de puissance de trois sources électriques en fonction de la demande de puissance de la charge et du SOC de batterie. De plus, le schéma de contrôle de la régulation de la tension du bus DC est considéré comme garantissant une tension stable pendant les fluctuations de puissance et permettant de suivre la limitation de vitesse du convertisseur de puissance. Le schéma fonctionnel de la stratégie de contrôle proposée est décrit dans la figure 4.2.

Les principaux objectifs d'un système de gestion de l'énergie sont de garantir les éléments suivants :

- Faible consommation d'hydrogène ;
- Efficacité globale élevée du système ;
- Portée étroite du SOC batterie/supercondensateur ;
- Long cycle de vie.

Ceci est réalisé en contrôlant la réponse en puissance de chaque source d'énergie avec la demande de charge via leurs convertisseurs associés, en utilisant une stratégie de gestion de l'énergie (EMS) donnée.

Dans ce système hybride, le PEMFC est utilisé comme source principale qui non seulement fournit de l'énergie pour la charge de traction, mais garantit également le niveau SOC du BAT dans la plage souhaitée. En conséquence, la demande de puissance de charge (Pload) et le SOC_{Batt} sont pris comme deux entrées pour le système de gestion d'énergie pour générer la puissance PEMFC de référence (P_{FC}^*). Cette puissance est divisée par la valeur de mesure de la tension PEMFC (V_{FC}) pour créer le courant PEMFC de référence (I_{FC}^*). Ce courant est comparé avec la valeur mesurée de courant de PEMFC (I_{FC}) l'erreur est transmise au régulateur PI pour commander le switch de boost. Pour la batterie, il est utilisé pour maintenir la tension du bus DC à la valeur de référence via la boucle de contrôle de tension. La tension de bus CC de référence ($V_{DC}^* = 400V$) et mesurée (V_{DC}) sont comparées les unes aux autres, et la tension différentielle est ensuite fournie au PI contrôleur pour produire le courant du bus DC (I_{BAT}^*). En raison de la réponse dynamique rapide, le SC prendra en charge le courant non compensé du PEMFC et du BAT.

Le contrôle du courant de **charge/décharge** de la batterie se fait selon la stratégie de contrôle par PI. Cela dépend d'une sommation de deux contrôleurs PI. L'un d'eux est basé sur la différence de puissance entre la charge et la puissance de PEMFC, et l'autre est basé sur la différence entre la valeur réelle et la référence du VDC, qui est de 400 VDC dans ce cas. Selon le résultat de ces deux contrôleurs PI, sortie de la stratégie par charge/décharge de la batterie.

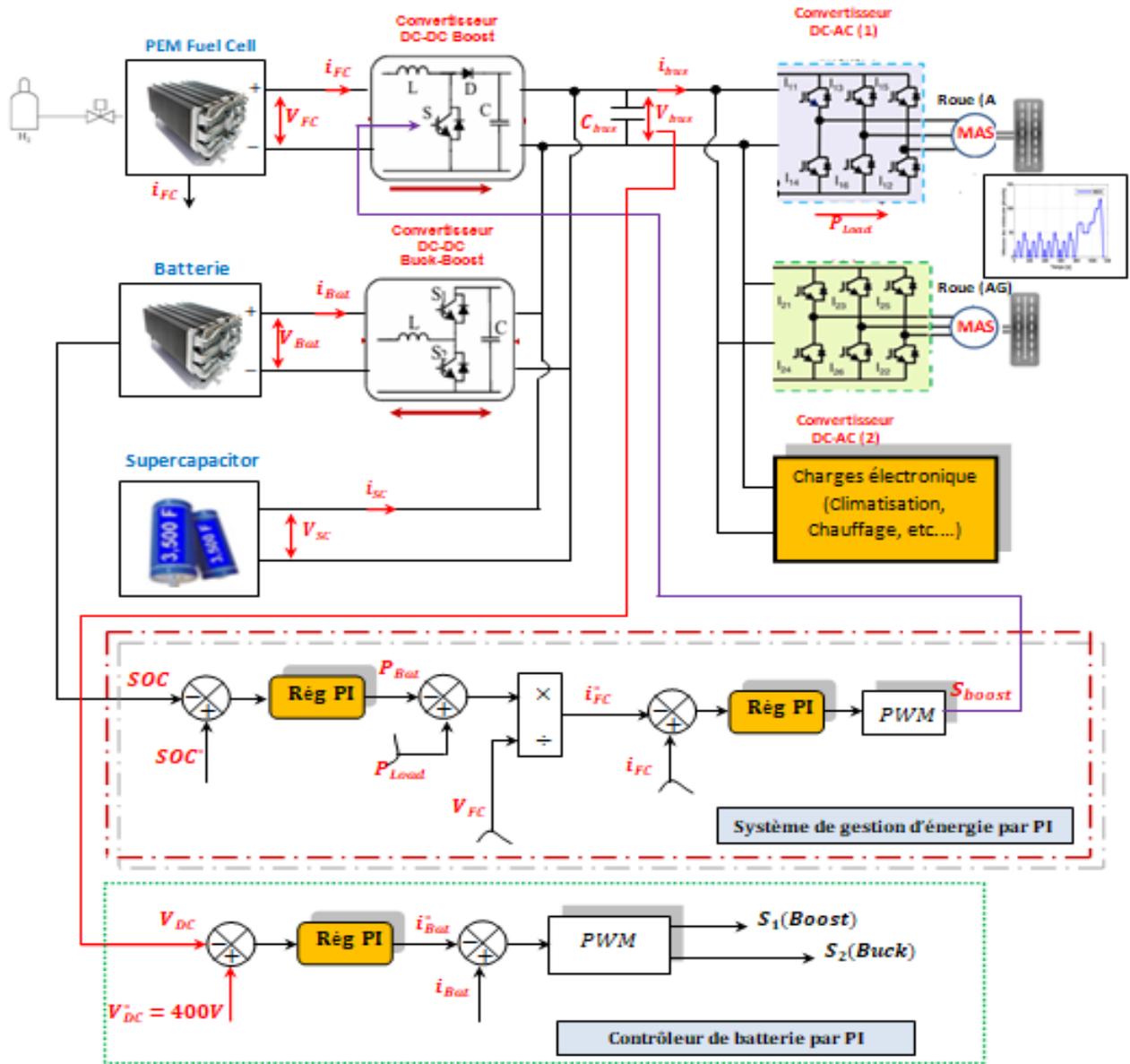


Figure 4.2: Stratégie de contrôle énergétique global pour le système d'alimentation hybride.

4.5. Profil de conduite proposée pour le véhicule électrique

En terme de définition, un cycle de vitesse représente la vitesse du véhicule en fonction du temps pendant un trajet spécifique. Il varie en fonction des conditions de la route ainsi que du mode de conduite. Les cycles couramment utilisés dans l'industrie automobile sont des simulations de conduite standardisées qui permettent de mesurer la consommation du carburant et les émissions polluantes des véhicules. Parmi ces cycles, on retrouve le cycle FTP (*Federal Test Procedure* en anglais et *Procédure d'essai fédérale* en français), utilisé aux Etats-Unis ainsi que de nombreux pays d'Amérique latine, le Nouveau Cycle Européen de Conduite (NEDC) et le World harmonised Light vehicle Test Procedure (WLTP), et le cycle ECE 15.

Ce sont des cycles de vitesse construits dans le but de représenter des conditions de route particulières caractérisées par le type de route, c'est-à-dire l'environnement de conduite

(Ville, autoroute, route de campagne, ...), les conditions de trafic et la densité des infrastructures de signalisation routière. Le cycle ECE15 fait partie du Nouveau Cycle Européen de Conduite (NEDC) et se caractérise par des vitesses basses ne dépasse pas 50 km/h, et des conditions représentatives de la conduite en ville, avec des accélérations et décélérations modérées. Ce cycle de conduite présente l'inconvénient d'être peut long avec une durée de 195 secondes, en parcourant une distance d'environ 1 km, et est souvent répété 4 fois dans le cycle NEDC complet, ce qui augmente le temps de simulation du système de traction, aussi ce cycle est caractérisé par une puissance faible P_{Load} , ce qui signifie que le moteur ne fonctionne pas à son régime nominal. Afin de résoudre ce problème, nous avons choisi dans ce mémoire un cycle de vitesse relativement court qui reflète de manière fidèle les conditions de circulation en milieu urbain et sur voie rapide. D'après un schéma précis sur une période de 80 secondes. Le profil de conduite court de 80 secondes (profil « Cycle_Test80s ») sera utilisé pour valider la stratégie de contrôle DTC et l'algorithme de gestion d'énergie hybride.

L'analyse des performances de la stratégie de gestion d'énergie pour le véhicule électrique hybride a été réalisée en utilisant le profil de vitesse du cycle Test_80s proposé, comme illustré dans la figure 4.3. Ce cycle est défini par onze phases successives. Dans la première phase, la phase d'accélération la vitesse de véhicule augmente pour atteint une vitesse de 135 km/h. Dans la deuxième phase, la vitesse de véhicule sera réduite à 50 km/h. Dans la troisième phase, le véhicule 2WD roule sur une route droite à la même vitesse. Pour la quatrième phase, on impose au véhicule un virage vers la droite avec un angle de braquage ($\delta = 20^\circ$) comme illustré dans la figure 4.4 à une vitesse de 50 km/h. Dans la phase 05, le véhicule se déplace sur une route droite à une vitesse de 50 km/h. Concernant la sixième phase, on impose un virage vers la gauche avec un angle de braquage ($\delta = -15^\circ$). Lors de la phase 7, le véhicule roule à la même vitesse sur une route droite 50 km/h. Dans la huitième phase, La voiture atteint une vitesse de 100 km/h. Au cours de la phase 9, le véhicule fait une pente d'un angle de 15° sur une route inclinée à une vitesse de 100Km/h. Dans la dixième phase, le véhicule roule avec la même vitesse 100 km/h. Finalement, la phase de décélération sur une route plate à basse vitesse (phase 11) est celle où la vitesse du véhicule diminue progressivement jusqu'à atteindre une vitesse de 15Km/h. Le tableau 4.1 présente les différentes phases de profil de vitesse par le cycle de conduite proposé.

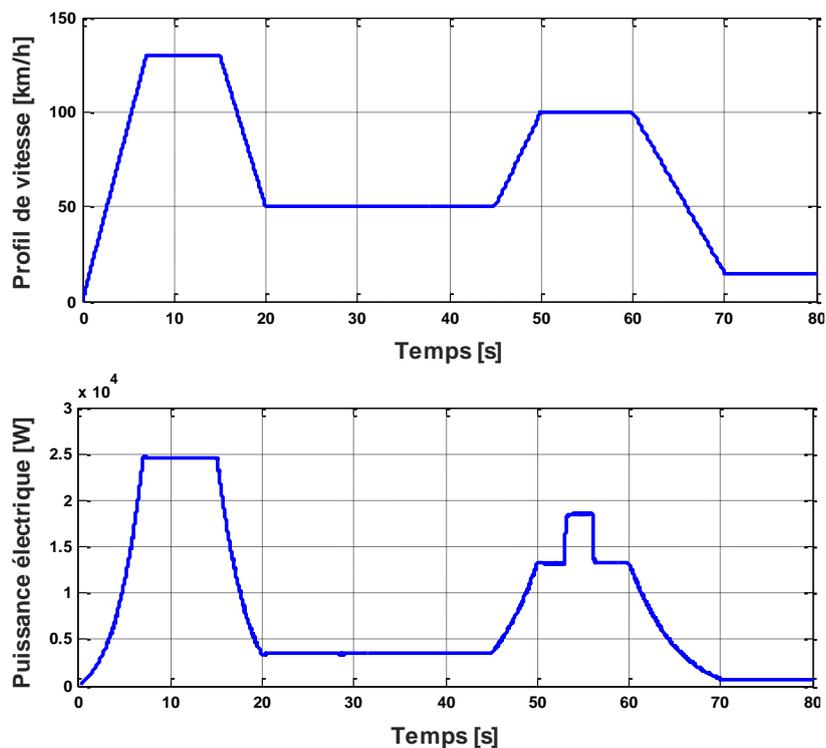


Figure 4.3: Profil de vitesse et puissance électrique (Cycle Test 80s).

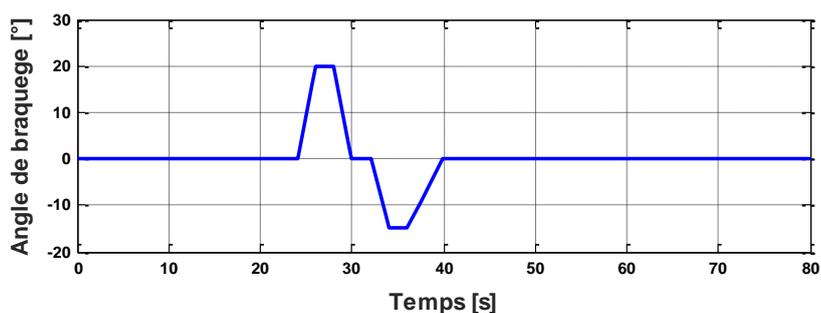


Figure 4.4: Angle de braquage.

Tableau 4.1: Différentes phases de vitesse par le cycle de conduite proposé.

| Phase | Temps [S] | Evènement | Vitesse du véhicule [Km/h] |
|-------|---------------------|--|----------------------------|
| 01 | $0 \leq t \leq 17$ | Démarrage + Accélération | 135 |
| 02 | $17 \leq t \leq 20$ | Décélération | 50 |
| 03 | $20 \leq t \leq 24$ | Route plate | 50 |
| 04 | $24 \leq t \leq 30$ | Virage à droite | 50 |
| 05 | $30 \leq t \leq 33$ | Route plate | 50 |
| 06 | $33 \leq t \leq 40$ | Virage à gauche | 50 |
| 07 | $40 \leq t \leq 45$ | Route plate | 50 |
| 08 | $45 \leq t \leq 54$ | Accélération | 100 |
| 09 | $54 \leq t \leq 56$ | Pente 15% | 100 |
| 10 | $56 \leq t \leq 60$ | Décélération | 100 |
| 11 | $60 \leq t \leq 80$ | Décélération sur une route plate + Basse vitesse | 15 |

Tableau 4.2: Différentes phases de puissance électrique par le cycle de vitesse proposé.

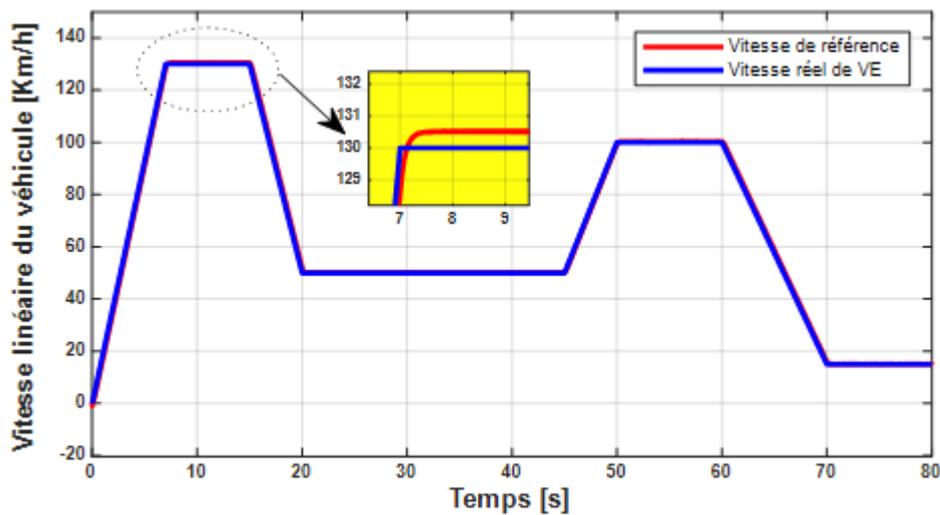
| Phase | Temps [S] | Evènement | Puissance électrique [KW] |
|-------|---------------------|--|---------------------------|
| 01 | $0 \leq t \leq 17$ | Démarrage + Accélération | 25 |
| 02 | $17 \leq t \leq 20$ | Décélération | 04 |
| 03 | $20 \leq t \leq 24$ | Route plate | 04 |
| 04 | $24 \leq t \leq 30$ | Virage à droite | 04 |
| 05 | $30 \leq t \leq 33$ | Route plate | 04 |
| 06 | $33 \leq t \leq 40$ | Virage à gauche | 04 |
| 07 | $40 \leq t \leq 45$ | Route plate | 04 |
| 08 | $45 \leq t \leq 54$ | Accélération | 13 |
| 09 | $54 \leq t \leq 56$ | Pente de 15% | 18 |
| 10 | $56 \leq t \leq 60$ | Décélération | 13 |
| 11 | $60 \leq t \leq 80$ | Décélération sur une route plate + Basse vitesse | 01 |

4.6. Résultats de simulation de la partie dynamique du véhicule électrique 2WD

La figure 4.5 présente les résultats de simulation de la vitesse linéaire du véhicule électrique. On remarque que la vitesse réelle du véhicule (V_{veh}) suit parfaitement la vitesse de référence (V_{veh}^*) donnée par le conducteur, avec un temps de convergence de 0.025 secondes et un dépassement de la vitesse de 1.5 km/h (0,4 %), ainsi qu'une erreur statique de 2 Km/h au démarrage (phase d'accélération). Les performances dynamiques et statiques sont résumées dans le Tableau 4.3. Selon les résultats, la vitesse du véhicule est toujours confondue à la consigne sur la route droite et lors des virages à gauche et droite, avec une vitesse de 50 km/h et une erreur statique nulle. Lorsqu'il y a une pente de 15 %, l'accélération et la décélération (à faible vitesse) généreront une erreur de vitesse considérable.

Tableau 4.3: Performances de la réponse de vitesse.

| Stratégie de contrôle | Dépassement [%] | Erreur statique [km/h] | Temps de montée [s] |
|-----------------------|-----------------|------------------------|---------------------|
| DTC | 0.4 | 3 | 7 |



(a)

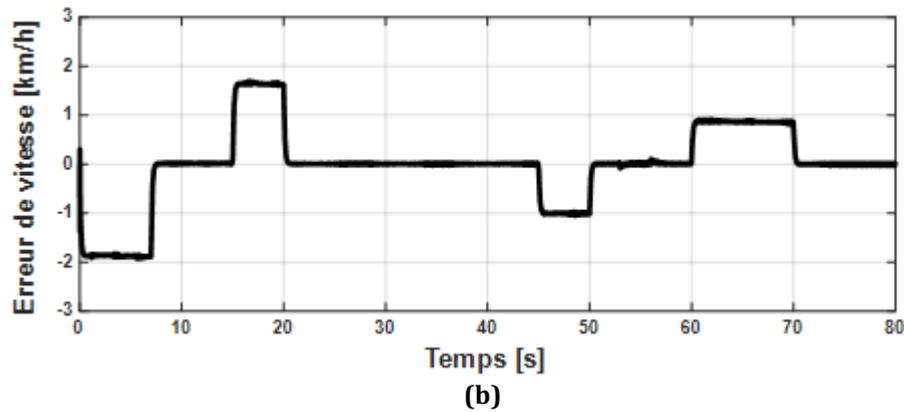


Figure 4.5 : Vitesse linéaire du véhicule électrique 2WD (a), Erreur de vitesse (b).

La figure 4.6 présente les résultats de simulation concernant les vitesses linéaires des roues motrices du véhicule à deux roues motrices (2WD). Cette figure met en évidence un suivi satisfaisant des variations de vitesse linéaire des roues motrices du véhicule depuis le démarrage jusqu'à l'établissement d'une vitesse en régime permanent, notamment lorsque le véhicule roule sur une trajectoire rectiligne. Initialement nulles, les vitesses des roues motrices du véhicule convergent vers la valeur de référence de 135 km/h (équivalent à 36 m/s) définie par le conducteur. À l'instant $t = 17$ s, la vitesse du véhicule est réduite à 50 km/h (soit 14 m/s), conservant cette valeur pendant environ 28 secondes. À ce moment, deux changements de direction sont initiés sur le châssis du véhicule, correspondant à un virage à droite puis à un virage à gauche, avec des angles de braquage respectifs de 20° et -15° . Ces manœuvres sont exécutées à vitesse constante, l'angle de braquage étant graduellement ajusté pour diriger les roues motrices dans la nouvelle direction. Lors du premier changement de trajectoire (virage à droite), la vitesse de la roue arrière gauche augmente jusqu'à 60 km/h, tandis que celle de la roue arrière droite diminue à 40 km/h.

Pour le virage à gauche, la vitesse de la roue arrière gauche décroît (39 km/h) tandis que celle de la roue arrière droite augmente (59 km/h). Les données de vitesse des roues motrices arrière gauche et droite sont répertoriées dans le Tableau 4.4 lorsque le véhicule effectue des manœuvres de virage.

Tableau 4.4: Valeur de vitesse des roues motrices pour les deux virages (km/h).

| Vitesse des roues (km/h) | Virage à droite | Virage à gauche |
|--------------------------|-----------------|-----------------|
| Roue arrière droite | 40 | 59 |
| Roue arrière gauche | 60 | 39 |

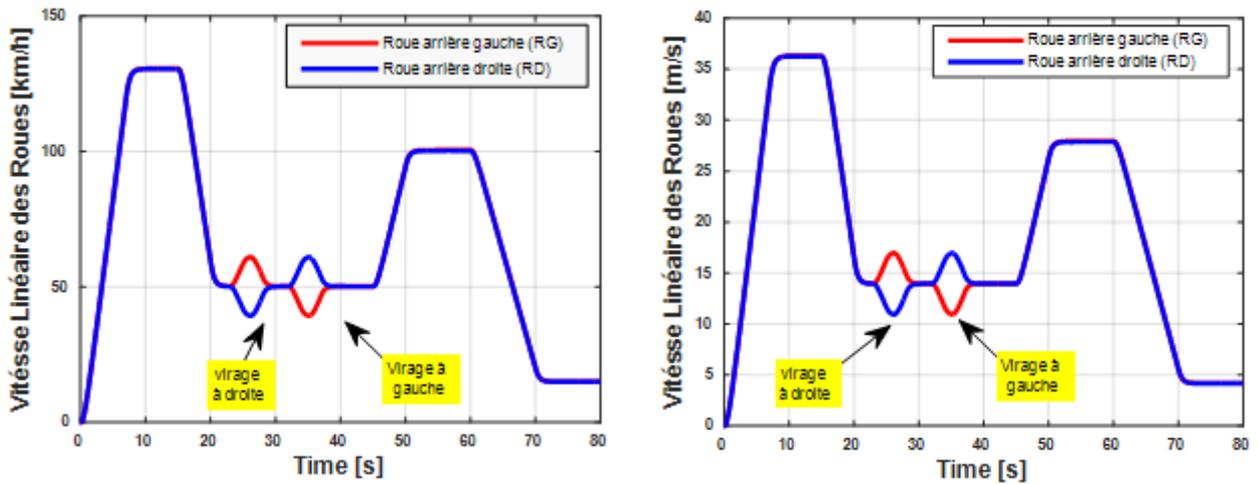


Figure 4.6 : Vitesse linéaire des roues arrière du véhicule électrique 2WD.

Les résultats de la simulation de la figure 4.7 montre l'évolution du couple électromagnétique généré par les deux moteurs (MAS) de propulsion du véhicule électrique 2WD en fonction du cycle de conduite proposé. Ces résultats mettent en évidence que les variations des couples électromagnétiques des deux moteurs restent équivalentes lorsqu'il s'agit d'un véhicule en ligne droite. Au début, lors du démarrage, les couples électromagnétiques des moteurs (M1 et M2) atteignent 90Nm, ce qui signifie que la vitesse des roues est stabilisée à leur valeur de référence. Cela indique que le véhicule doit fournir un couple moteur plus important pour surmonter la résistance aérodynamique croissante et maintenir ou accélérer sa vitesse. De plus, les réponses du couple peuvent varier en fonction de la trajectoire initiée par le conducteur, notamment après un changement de vitesses du véhicule. Quand le véhicule traverse un virage à droite, le couple électromagnétique produit par le moteur arrière droit (M1) augmente initialement tandis que celui généré par le moteur arrière gauche (M2) diminue.

De manière symétrique, dans un virage à gauche, le processus observé dans un virage à droite se reproduit, mais de manière inversée. À la suite d'une augmentation de 15% de la pente à l'instant $t = 54s$, sous l'effet du poids du véhicule, un couple de 94Nm est atteint. Les valeurs des couples électromagnétiques des moteurs arrière gauche et droit (M1, M2) sont présentées dans le tableau 4.5.

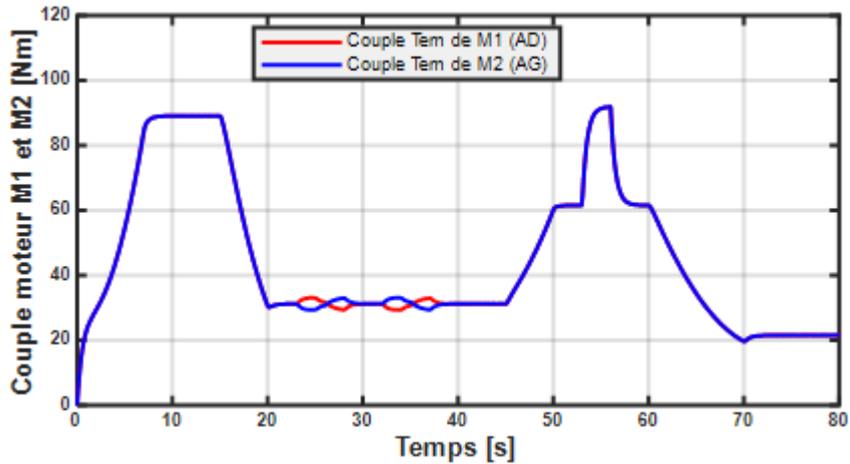


Figure 4.7 : Réponse de couple électromagnétique développée par les moteurs arrière M1 et M2.

Tableau 4.5: Valeur de couple électromagnétique de chaque moteur.

| Couple Électromagnétique des moteurs (Nm) | Phase 01 | Phase 02 | Phase 03 | Phase 04 | Phase05 | Phase 06 | Phase 07 | Phase 08 | Phase09 | Phase 10 | Phase 11 |
|---|----------|----------|----------|----------|---------|----------|----------|----------|---------|----------|----------|
| Moteur M1 (AD) | 90 | 31 | 31 | 35 | 31 | 28 | 31 | 60 | 94 | 60 | 20 |
| Moteur M2 (AG) | 90 | 31 | 31 | 35 | 31 | 28 | 31 | 60 | 94 | 60 | 20 |

La variation du courant de phase sollicité par chaque moteur (MAS) est représentée dans la figure 4.8. En fonction de la direction donnée au véhicule (changement de consigne de vitesse), chaque moteur requiert un appel de courant substantiel au démarrage afin d'atteindre la vitesse de référence prescrite par le conducteur. Lors des virages et lorsque le véhicule évolue sur une route présentant une pente de 10%, chaque moteur doit générer un courant supplémentaire de forme sinusoïdale uniforme durant cette période pour surmonter cette variation de topographie routière. De plus, à basse vitesse à $t = 68s$, l'allure des courants statoriques décrit une trajectoire sinusoïdale uniforme sans distorsion, contrairement à la phase précédente, présentant des ondulations significatives. Le tableau 4.6 expose la variation du courant statorique de chaque moteur au cours du cycle de conduite.

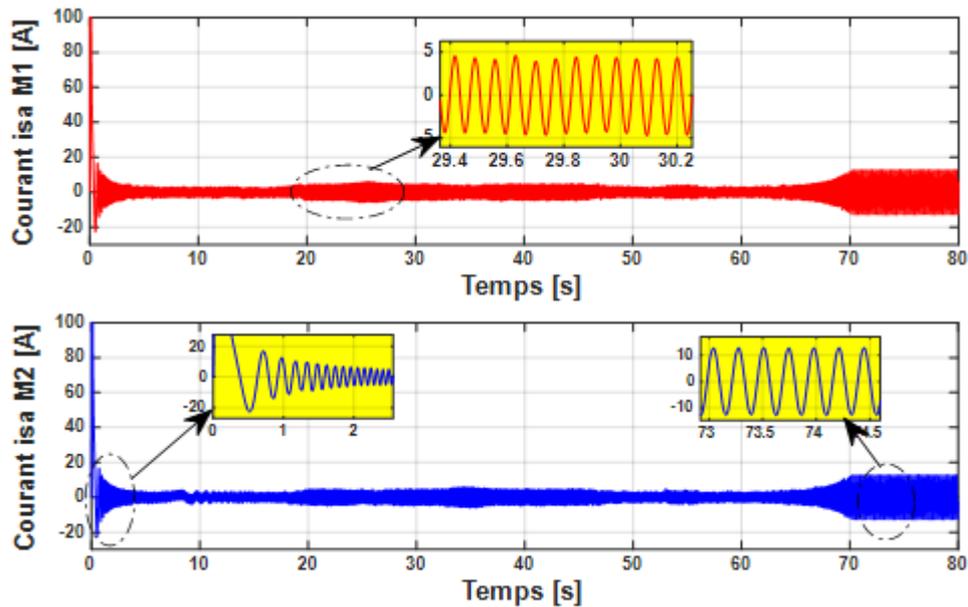


Figure 4.8: Allure de courant statorique appelé par les moteurs arrière M1 et M2.

Tableau 4.6: Variation de courant statorique de chaque moteur.

| Courant statorique de phase des moteurs | Phase 01 | Phase 02 | Phase 03 | Phase 04 | Phase 05 | Phase 06 | Phase 07 | Phase 08 | Phase 09 | Phase 10 | Phase 11 |
|---|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Moteur M1 (AD) | ±3.9 | ±3.9 | ±4.9 | ±4.9 | ±4.9 | ±4.9 | ±4.9 | ±3.9 | ±4.9 | ±3.9 | ±12 |
| Moteur M2 (AG) | ±3.9 | ±3.9 | ±4.9 | ±4.9 | ±4.9 | ±4.9 | ±4.9 | ±3.9 | ±4.9 | ±3.9 | ±12 |

La figure 4.9 illustre la trajectoire du vecteur de flux statorique dans le plan (α, β) lié au stator pour les deux moteurs (M1, M2). On peut voir que l'extrémité du flux statorique prendre une trajectoire circulaire présentant une légère déformation, Il est dû à l'utilisation des régulateurs hystérésis et à la table de commutation. Cette trajectoire circulaire a un rayon de 0.8 Wb et est centrée à l'origine.

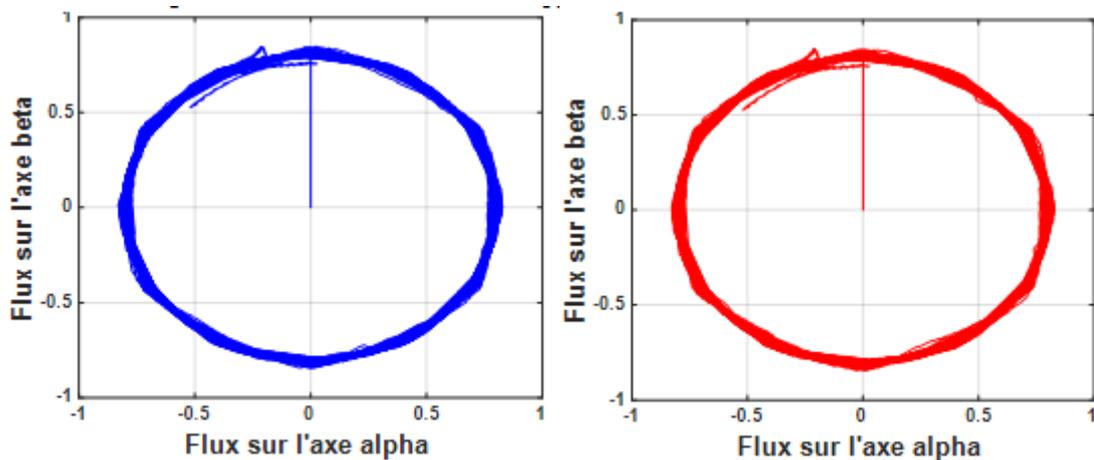


Figure 4.9 : Trajectoire de flux statorique dans le plan $(\alpha - \beta)$ des moteurs M1 et M2.

La figure 4.10 illustre les forces de traction générées par les moteurs arrière du véhicule. Dans un premier temps, il est observé que ces moteurs fournissent des forces de traction considérables pour initier le mouvement du véhicule depuis son arrêt initial. Il est évident que cette observation est cohérente, car ces forces doivent dépasser les résistances globales au mouvement du véhicule. Par ailleurs, une disparité dans les forces de traction est également relevée lors des phases de virage (phases 04 et 06). En effet, les moteurs en position de virage produisent des forces de traction inférieures à celles des moteurs en position non tournée.

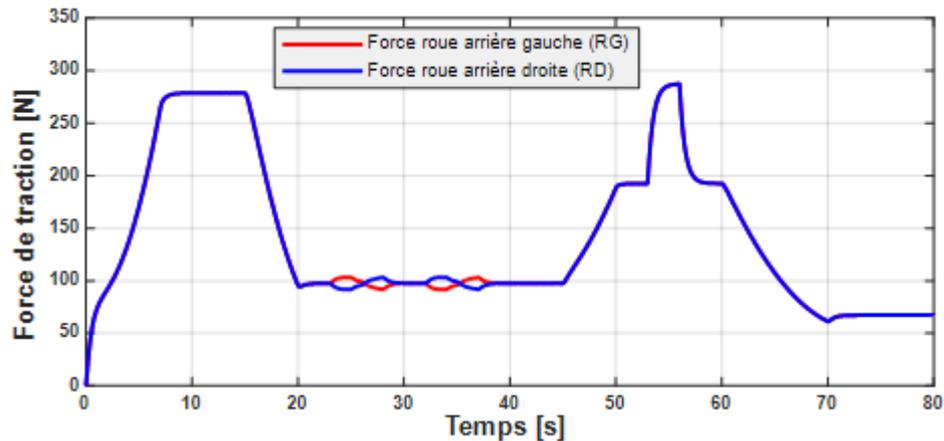


Figure 4.10: Force de traction développée par les moteurs arrière du véhicule.

La figure 4.11 présente les couples résistants à l'avancement du véhicule. Les résultats de la simulation révèlent une valeur significative du couple aérodynamique, atteignant environ 136 Nm pour la phase 01. Cette augmentation peut être attribuée à une surface frontale élevée. De plus, une diminution du couple aérodynamique est observée jusqu'à 20 Nm lors des virages à droite et à gauche, suivie d'une augmentation lors de la pente de 15% (75 Nm). À faible vitesse, la résistance du couple se stabilise autour de zéro. Par conséquent, l'augmentation de la vitesse entraîne une augmentation du couple résistant aérodynamique, devenant ainsi le principal obstacle au mouvement du véhicule à grande vitesse, nécessitant davantage de puissance motrice pour le surmonter. En ce qui concerne le couple résistant lié au roulement, il reste relativement constant à une valeur de 40 Nm tout au long du cycle de conduite, malgré les variations de vitesse du véhicule, indiquant que ce couple dépend principalement de la masse du véhicule (M) et du coefficient de résistance au roulement (C_{rr}). En revanche, le couple résistant lié à la pente est nul au départ, puis augmente de manière linéaire avec l'angle de la pente ($\alpha=15\%$) jusqu'à atteindre la valeur de 55 Nm.

Le couple résistant total est la somme des couples résistants liés à la pente, au roulement et à l'aérodynamique. On observe une variation de la valeur du couple résistant T_R en fonction

de la topologie de la route. Ainsi, une augmentation de la vitesse au démarrage et la présence de pentes entraînent une augmentation du couple résistant total, tandis qu'il diminue jusqu'à atteindre 40 Nm à basse vitesse. Le véhicule électrique présente toujours un couple résistant total inférieur au couple nominal ($C_n = 477.48$) tout au long du cycle de conduite. Le Tableau 4.7 présente les variations des couples résistants au roulement du véhicule.

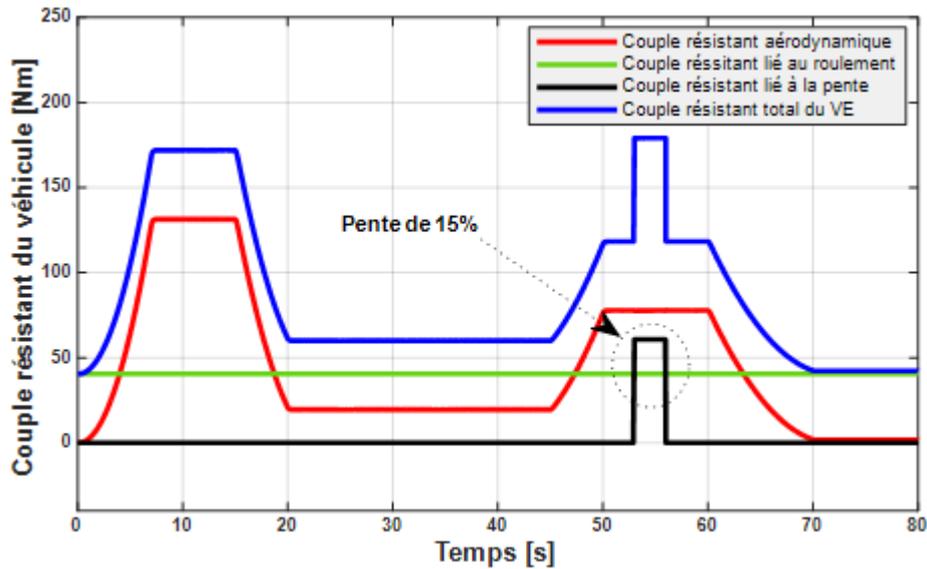


Figure 4.11 : Evolution des couples résistants du véhicule.

Tableau 4.7: Variation des couples résistants au roulement du VE2WD durant le cycle de conduite.

| Phases | Couple aérodynamique (Nm) | Couple résistanttotal (Nm) | Couple lié à la pente | Couple lié au roulement (Nm) |
|--------|---------------------------|----------------------------|-----------------------|------------------------------|
| 01 | 136 | 170 | 0 | 40 |
| 02 | 20 | 60 | 0 | 40 |
| 03 | 20 | 60 | 0 | 40 |
| 04 | 20 | 60 | 0 | 40 |
| 05 | 20 | 60 | 0 | 40 |
| 06 | 20 | 60 | 0 | 40 |
| 07 | 20 | 60 | 0 | 40 |
| 08 | 75 | 120 | 0 | 40 |
| 09 | 75 | 171 | 55 | 40 |
| 10 | 75 | 120 | 0 | 40 |
| 11 | 0 | 40 | 0 | 40 |

4.7. Résultats de simulation de la partie de la gestion d'énergie

La figure 4.12 illustre la variation des diverses puissances dans le véhicule électrique, notamment la puissance de la pile à combustible (P_{fc}), la puissance de la batterie (P_{batt}), la puissance de charge (P_{charge}), ainsi que la puissance du supercondensateur (P_{sc}), à mesure que le EV2WD se déplace sur différentes trajectoires, en utilisant la méthode PI classique. Il est observé une augmentation de la puissance de charge du véhicule électrique lors de la phase de démarrage, atteignant jusqu'à 45 Kw, puis dans la pente, la puissance atteint la valeur de

35 Kw. On note une diminution de la puissance au cours des virages avec une valeur de 8Kw, ainsi à basse vitesse (Durant le freinage) avec une valeur de 1Kw.

D'après la figure 4.12, il est notable que la variation de la puissance de la pile à combustible suit les variations de la puissance de charge. La conclusion de cette observation est que la pile à combustible PEM est la principale source d'énergie. Son fonctionnement débute à $t=3s$, atteignant un pic de démarrage de 14 Kw. Lorsque la demande de puissance est faible, notamment lors des virages et du freinage, la puissance de la pile à combustible diminue, tandis qu'elle assure simultanément la recharge de la batterie, qui agit en tant que source de stockage.

Lorsque la demande de puissance atteint des niveaux élevés, la batterie (élément de stockage), ainsi que le supercondensateur, contribuent à la traction en fournissant une partie de la puissance requise, tandis que le reste de la puissance est fourni par la pile à combustible. Pendant les virages et les phases de freinage, la puissance fournie par la batterie diminue (état de charge de la batterie), tandis que la puissance du supercondensateur devient nulle.

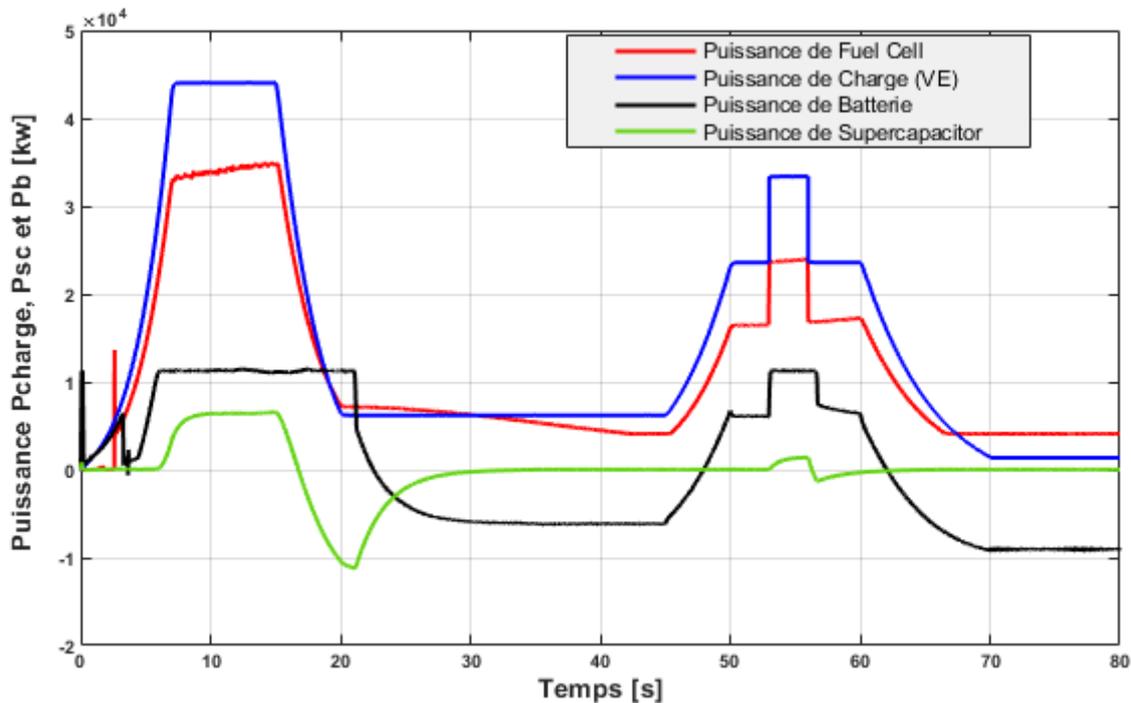


Figure 4.12 : Répartition des puissances durant le Test 80s cycle.

Selon la figure 4.13, la tension produite par une pile à combustible varie en fonction de la puissance de charge et du courant. Au moment où la pile à combustible démarre à l'instant $t=3s$, la tension et le courant augmentent considérablement. Lors de fortes charges, comme lors de la montée d'une pente ou lors d'une accélération, la tension de la pile à combustible

baisse légèrement et le courant augmente.

Ainsi, le courant suit toujours la variation de la puissance de charge. Il est à noter que la tension et le courant varient de manière inversement proportionnelle dans une pile à combustible, en fonction des conditions de charge et de décharge.

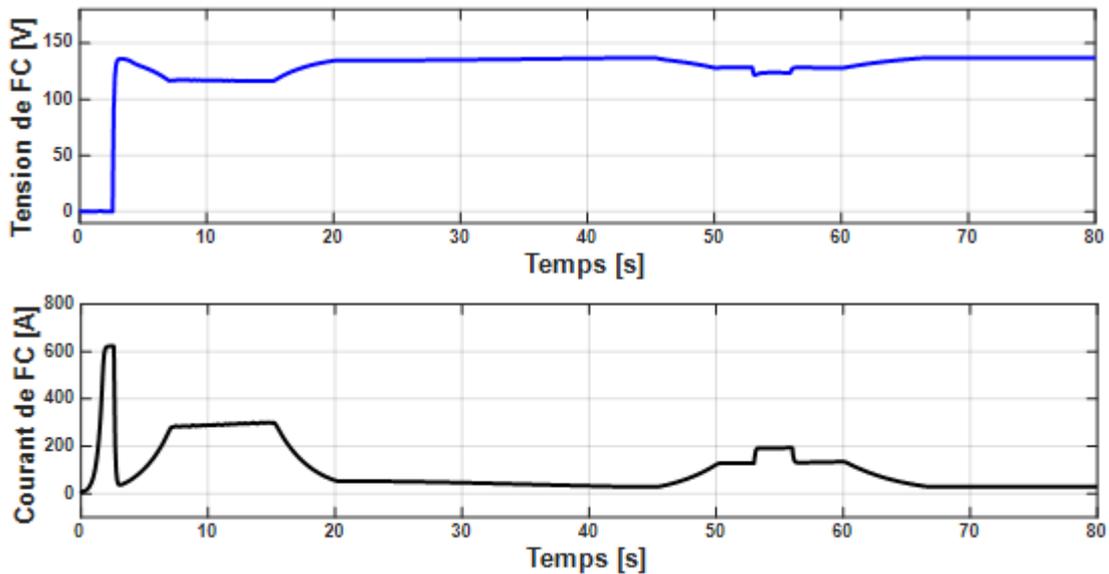


Figure 4.13 : Tension et courant développés par la PàC durant le Test 80s cycle.

La figure 4.14 montre que la tension du bus continu est conforme à sa référence de 400V, avec un pic de valeur atteignant 400.5V au démarrage. Lorsque le véhicule présente une forte demande de puissance, en particulier pendant la phase d'accélération et sur les pentes, la tension du bus continu peut augmenter, favorisant ainsi le maintien de la stabilité du système électrique, la compensation des pertes d'énergie et l'optimisation de l'efficacité globale du système.

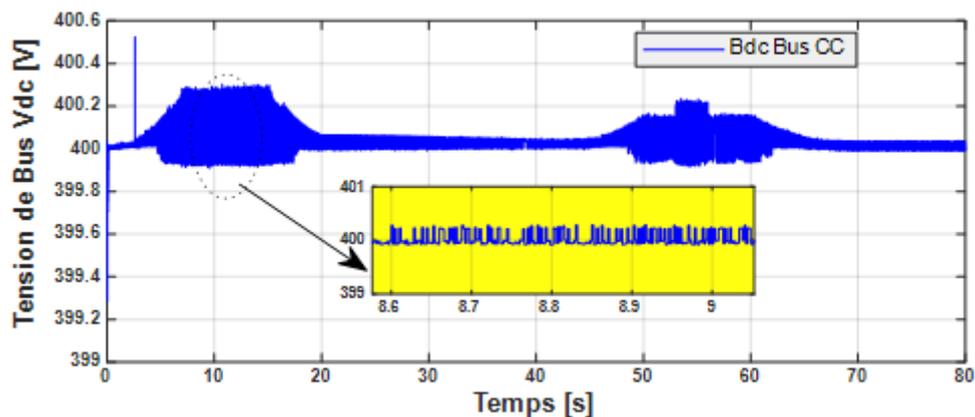


Figure 4.14: Tension du bus CC pour un profil de conduite de 80 secondes.

L'état de charge de la batterie évolue en fonction du mode de charge et de décharge. Selon le schéma 4.15(b), on peut constater que l'état de charge initial de la batterie est de 60%. Les périodes de charge correspondent aux moments où l'énergie est récupérée, comme lors du freinage ou suite à une demande de puissance de charge faible. La diminution de l'état de charge survient lorsque la puissance de charge demandée est élevée, notamment lorsque l'élément de stockage participe à la traction du véhicule. En outre, à la fin du cycle de conduite, l'état de charge final de la batterie est quasiment ramené au même niveau qu'au début du cycle, comme illustré dans la Figure 4.15(b). Il s'agit de l'énergie récupérée lors du freinage avant l'arrêt du véhicule, pour recharger la batterie, qui est un élément de stockage. Cette recharge de la batterie est assurée par la pile à combustible.

En ce qui concerne le supercondensateur, le SC a une transition douce dans les opérations de charge/décharge, car elle a une réponse rapide et une densité de puissance élevée, comme le montre la même figure 4.15(a).

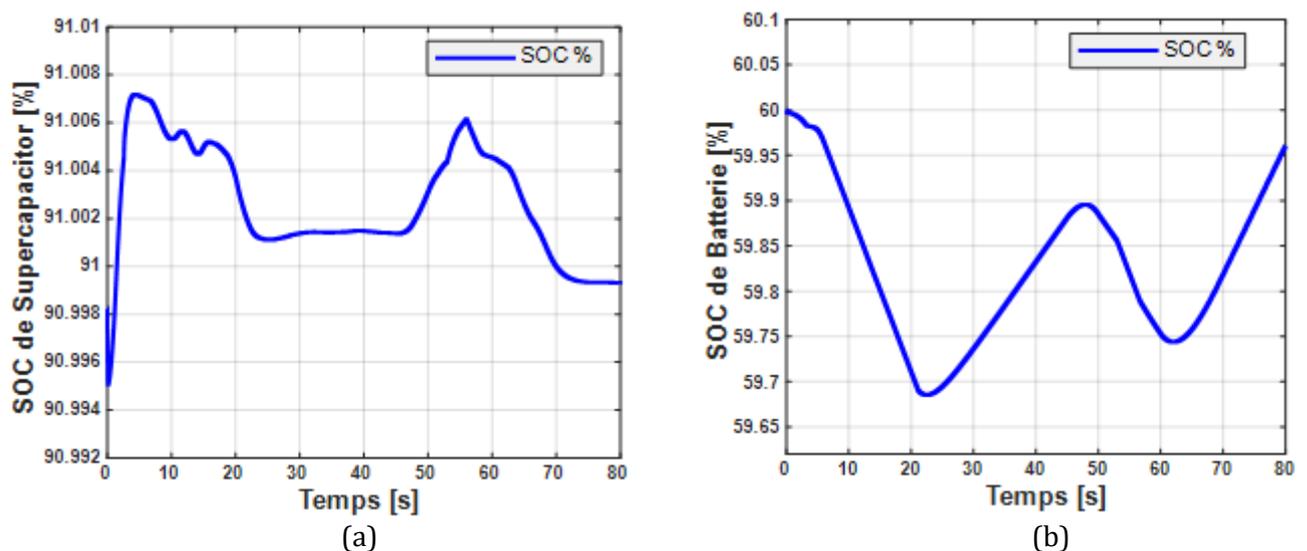


Figure 4.15: SOC de la batterie (a) et du supercondensateur (b) sous Test 80s cycle.

D'après la figure 4.16, lors du démarrage et lorsque la puissance de charge atteint des niveaux élevés, la consommation d'hydrogène en (l/min) augmente. En revanche, la pile à combustible consomme moins d'hydrogène lorsque la demande de puissance de charge est faible.

En ce qui concerne la consommation d'hydrogène en (g), on note une augmentation continue de la consommation de l'hydrogène, avec une consommation élevée pendant les phases de faible puissance de charge, notamment pendant le freinage (récupération d'énergie par la batterie, impliquant ainsi la recharge de la batterie par la pile à combustible).

Ainsi, la forte consommation d'hydrogène pendant le freinage permet d'atteindre l'état de charge initial de la batterie, soit 60%.

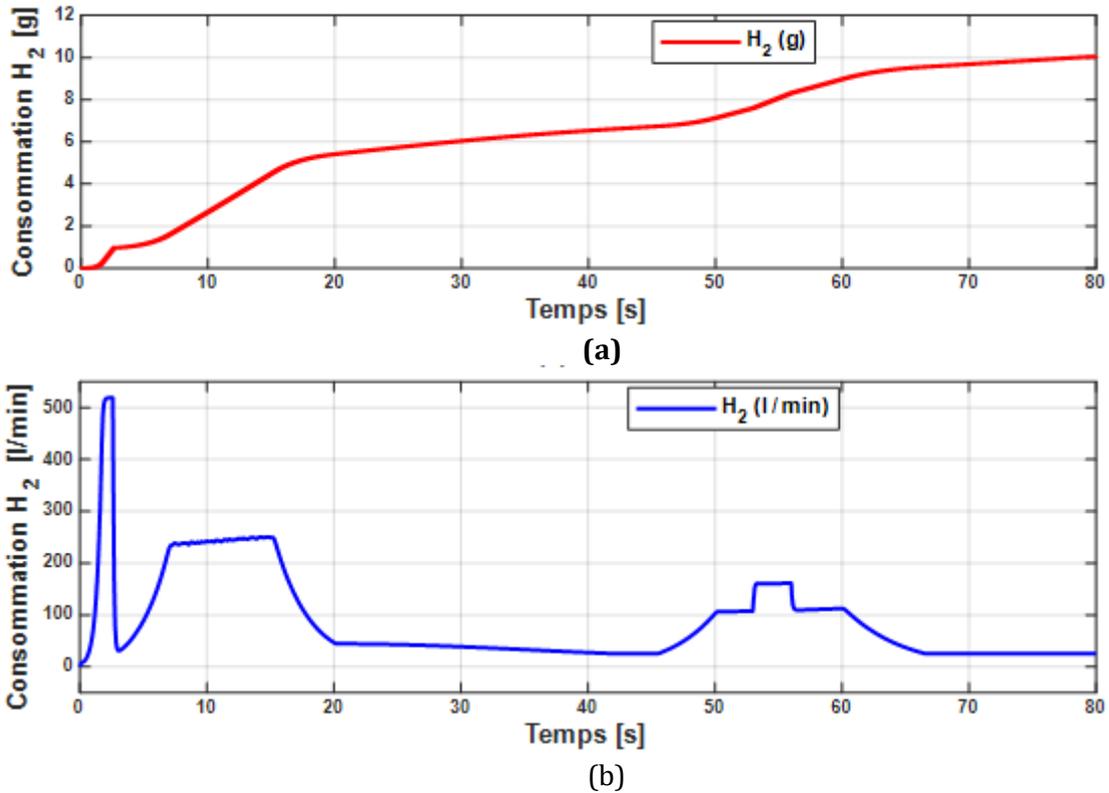


Figure 4.16: Consommation de l'hydrogène H₂ de la pile à combustible pour un profil de conduite de 80 secondes (a) H₂ en g et (b) H₂ en l/min.

La figure 4.17 présente la variation de la distance traversée par le véhicule électrique. On peut voir que la distance parcourue par le véhicule sur tout le cycle de conduite est de **6010 m**.

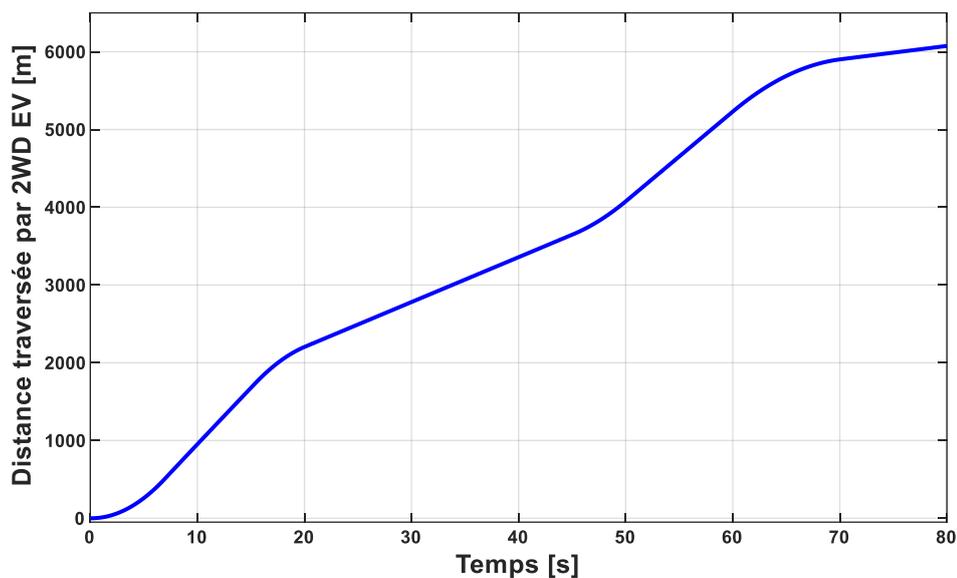


Figure 4.17 : Variation de la distance parcourue par le véhicule électrique 2WD durant le cycle de conduite 80s.

Tableau 4.8 : Variation de la distance parcourue par le véhicule durant le cycle de conduite.

| | Phase01 | Phase02 | Phase03 | Phase04 | Phase05 | Phase06 | Phase07 | Phase 08 | Phase 09 | Phase 10 | Phase 11 |
|--|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|----------|----------|----------|
| Distance parcourue par le véhicule (m) | 2000 | 100 | 300 | 495 | 103 | 302 | 400 | 900 | 190 | 420 | 800 |

D'après la figure 4.18, il est observé que le courant du supercondensateur varie en fonction de sa puissance. Pendant la phase d'accélération et sur la pente, le courant augmente. En revanche, il diminue jusqu'à atteindre -21A, puis se stabilise à 0A à la fin du cycle. En ce qui concerne la courbe de la tension, il est constaté qu'à des niveaux de puissance de charge élevés, la tension diminue, comme c'est le cas lors de l'ascension d'une pente (395V) ou pendant une accélération (389V). Par conséquent, le courant s'ajuste toujours pour revenir à la tension de 400V, qui correspond à la tension du bus continu.

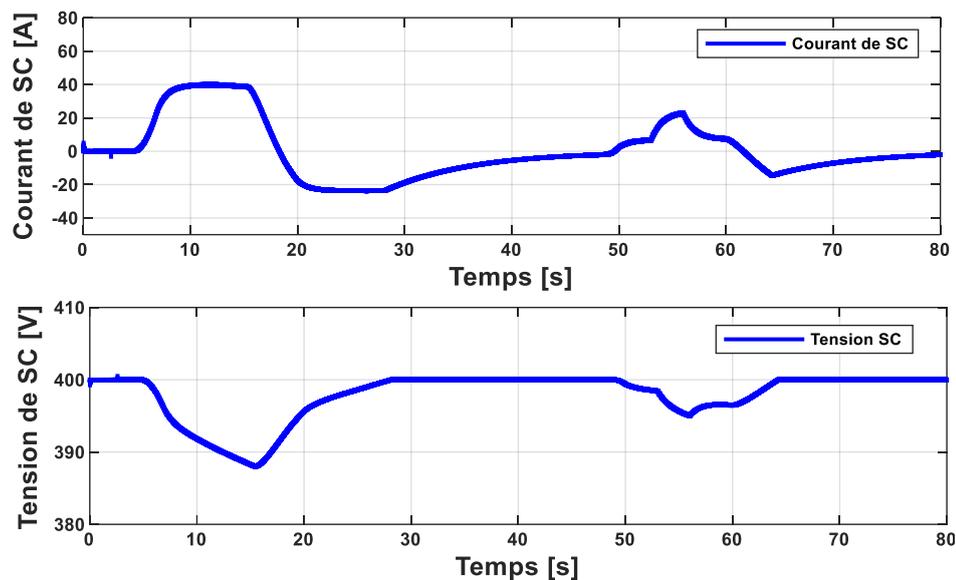


Figure 4.18: Tension et courant développés par la SC durant le Test 80s cycle.

Le tableau 4.9 présente une comparaison entre les résultats de consommation d'hydrogène par la stratégie de contrôle PI pour les profils de conduite suivants : Test 80s, Test 60s, urbaine UDDS répété deux fois et US6.

Dans le cas du Test 60s, la consommation de l'hydrogène a été la meilleure parmi les quatre profils de conduite utilisés, avec une consommation d'hydrogène de 3,53g. De même notre cycle de conduite suggéré (Test 80s cycle) a démontré de bonnes performances en ce qui concerne la consommation d'H₂, avec une consommation de 10 g.

Tableau 4.9: Tableau comparatif de la consommation d'hydrogène avec la stratégie PI et des profils de conduite différents.

| | Stratégie | Profil de conduite | Consommation d'Hydrogène (g) | Distance et durée du parcours |
|--|-----------|--------------------|------------------------------|-------------------------------|
| Notre propre travail | PI | Test80s | 10 | 6.010 km/80s |
| Ernesto VILCHEZ YNCA, « Étude comparative d'algorithmes de gestion de l'énergie pour un véhicule hybride à pile à hydrogène », École de technologie supérieure université du Québec, 2014. | PI | Test60s | 3.53 | - |
| | | UDDSx2 | 140.12 | 23.97 km /2 739 s |
| | | US06 | 116.69 | 12.88 km /600 s |

4.8. Conclusion

Ce chapitre est dédié à la présentation des résultats de simulation obtenus sous Matlab/Simulink pour le système global du véhicule électrique, en utilisant la stratégie de contrôle de gestion d'énergie basée sur le PI classique. Les performances dynamiques du véhicule ainsi que les résultats du système de gestion d'énergie seront analysées suivant un cycle de conduite spécifié.

Nous avons commencé par décrire et expliquer le principe de fonctionnement du schéma global de l'EMS. Ensuite, nous avons exploré les différentes stratégies de gestion d'énergie disponibles, en offrant un aperçu détaillé de la méthode de contrôle PI classique. Les résultats de simulation illustreront comment cette approche influence les performances dynamiques du véhicule et l'efficacité de la gestion de l'énergie tout au long du cycle de conduite.

Conclusion Générale

Ce mémoire de fin d'études nous a permis d'approfondir la compréhension et l'analyse des véhicules électriques intégrant des sources d'énergie hybrides, en abordant les aspects fondamentaux, technologiques et opérationnels de manière exhaustive.

Dans le premier chapitre, nous avons tracé l'évolution historique des véhicules électriques, depuis leurs débuts jusqu'à leur statut actuel en tant que composante majeure de l'industrie automobile. Nous avons examiné les différentes configurations adoptées par les constructeurs pour répondre aux divers besoins des consommateurs et aux défis de la durabilité. Une analyse critique des avantages et des inconvénients de ces véhicules a été réalisée, offrant un aperçu équilibré de leurs implications environnementales, économiques et sociales. En explorant les infrastructures de recharge disponibles, nous avons souligné la nécessité de développer des réseaux de recharge efficaces pour soutenir la croissance rapide du parc de véhicules électriques, tout en présentant les technologies automobiles et de recharge les plus innovantes pour 2024.

Le deuxième chapitre a introduit la chaîne de traction des véhicules électriques, avec un focus sur la modélisation dynamique et la cinématique de braquage. Nous avons analysé les forces agissant sur le véhicule et détaillé la modélisation et le dimensionnement des composants de la chaîne de traction, y compris les motorisations, batteries, piles à combustible, supercondensateurs et convertisseurs. Différentes topologies et configurations pour le couplage des sources d'énergie ont également été explorées.

Le troisième chapitre a présenté la commande directe du couple (DTC) pour la machine asynchrone. Cette méthode a démontré sa robustesse par rapport à d'autres structures de contrôle, comme la commande vectorielle à orientation du flux rotorique. Nous avons mis en évidence les avantages de la DTC, notamment son insensibilité aux variations des paramètres rotoriques et ses défis, tels que la gestion de la fréquence de commutation et les fluctuations du couple électromagnétique et du flux statorique.

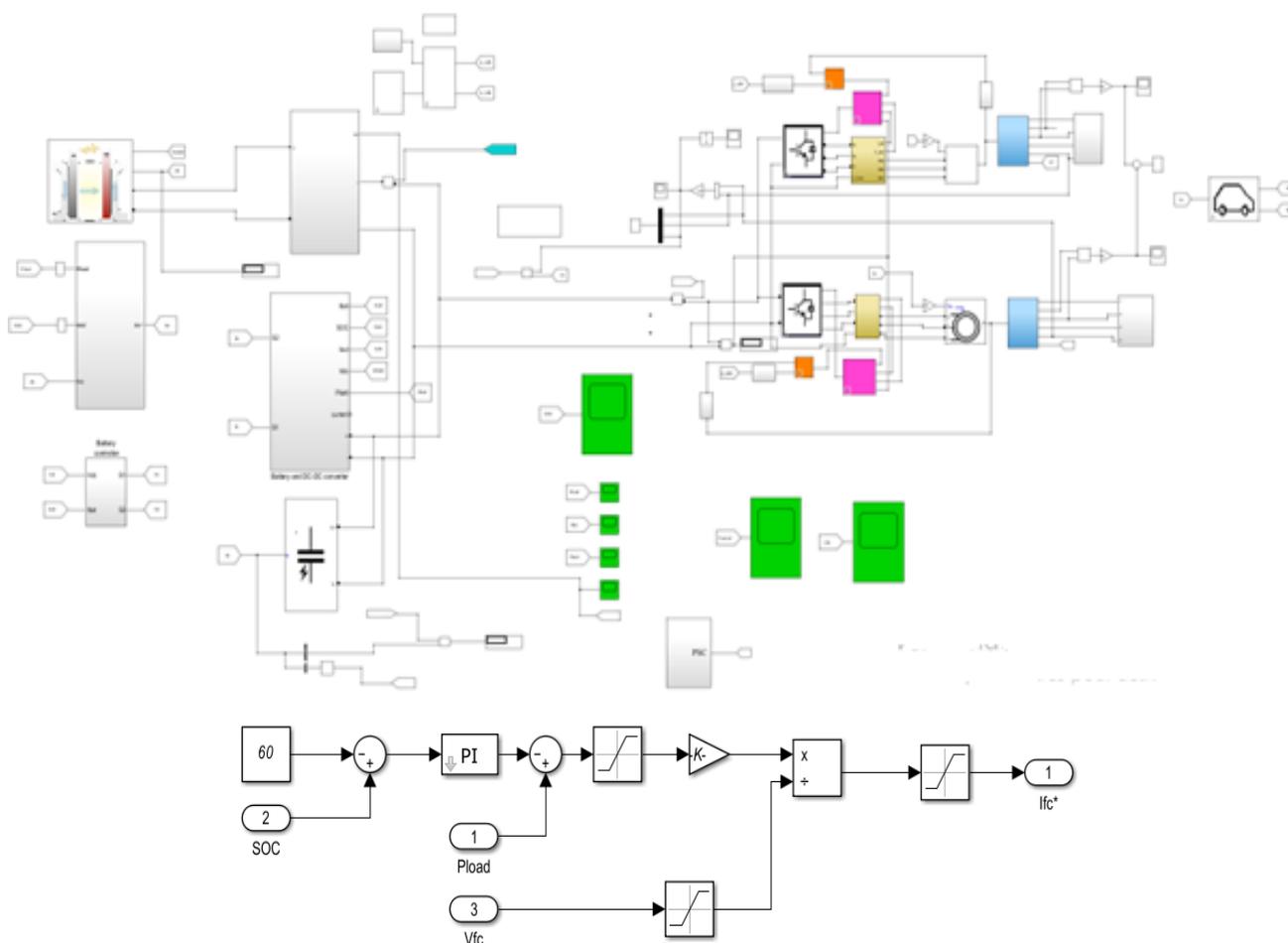
Annexe

1. Caractéristiques et paramètres nominaux de la machine asynchrone

Tableau 0.1: Paramètres nominaux de la machine asynchrone utilisé.

| Description | Symboles | Valeurs | Unités |
|---------------------------|------------|----------|-------------------|
| Tension Nominale | V_n | 400 | volts |
| Puissance nominale | P_n | 37 | kW |
| Fréquence nominale | f_n | 50 | Hz |
| Nombre de paires de poles | P | 2 | / |
| Vitesse nominale | ω_n | 1480 | Tr/min |
| Couple nominale | C_n | 500 | N.m |
| Résistance statorique | R_s | 0.08233 | ohm |
| Résistance rotorique | R_r | 0.0503 | ohm |
| Inductance statorique | L_s | 0.000724 | H |
| Inductance rotorique | L_r | 0.000724 | H |
| Inductance Mutuelle | L_m | 0.02711 | H |
| Coefficient de frottement | f_c | 0.02791 | N.m.s |
| Moment d'inertie | J | 0.37 | Kg.m ² |

2. Schéma globale du système de traction sous matlab/simulink



Bibliographie

- [1] S. F. Tie and C. W. Tan, "A review of energy sources and energy management system in electric vehicles", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 20, pp. 82 – 102, 2013.
- [2] W. Waag, C. Fleischer, and D. U. Sauer, "Critical review of the methods for monitoring of lithium-ion batteries in electric and hybrid vehicles," *Journal of Power Sources*, vol. 258, pp. 321–339, 2014.
- [3] C. C. Chan, A. Bouscayrol, and K. Chen, "Electric, hybrid, and fuel-cell vehicles: Architectures and modeling," *IEEE transactions on vehicular technology*, vol. 59, no. 2, pp. 589–598, 2009.
- [4] H. Helms, M. Pehnt, U. Lambrecht, and A. Liebich, "Electric vehicle and plugin hybrid energy efficiency and life cycle emissions", In 18th International Symposium Transport and Air Pollution, Session, volume 3, page 113. Citeseer, 2010.
- [5] K.V. Singh, H. Om Bansal, and D. Singh, "A comprehensive review on hybrid electric vehicles: architectures and components", *Journal of Modern Transportation*, 27(2):77–107, 2019.
- [6] P. Schott, J.P. Poirot, and P. Baurens, "Modélisation et simulation de la source d'énergie à pile à combustible du véhicule hydrogen", In *Annales de Chimie Science des Matériaux*, volume 26, pages 27–42. Elsevier, 2001.
- [7] W. Lee, E. Schubert, Y. Li, S. Li, D. Bobba, and B. Sarlioglu, "Electrification of turbocharger and supercharger for downsized internal combustion engines and hybrid electric vehicles-benefits and challenges", In 2016 IEEE transportation electrification conference and expo (ITEC), pages 1–6. IEEE, 2016.
- [8] Z. Wu, "Conception optimale d'un entraînement électrique pour la chaîne de traction d'un véhicule hybride électrique : Co-conception des machines électriques, des convertisseurs de puissance et du réducteur planétaire", PhD thesis, 2012.
- [9] <https://quechoisir-montpellier.org/vehicules/424-la-voiture-electrique>.
- [10] A. Daanoun, "Contribution à l'étude et à l'optimisation d'une Machine Synchrone à Double Excitation pour Véhicules Hybrides", Thèse de doctorat, université de Grenoble, 2012.
- [11] S. Cail, "Transport and energy", *Journal of cleaner production*, 243:118614, 2020.
- [12] P. Camilleri, "What future for electric light commercial vehicles? : a prospective economic and operational analysis of electric vans for business users, with a focus on urban freight", PhD thesis, 2018.

- [13] <https://www.infonormandie.com>, publié le 08/06/2015.
- [14] <https://www.tesla-mag.com>, Publié par Par Teslam le 26 avril 2024.
- [15] Lyonel Baum, “Les voitures électriques et leurs sources d’énergie”, [http://knol.google.com/k/les-voitures-électriques-et-leurs-sources-d-énergie](http://knol.google.com/k/les-voitures-electriques-et-leurs-sources-d-energie).
- [16] <https://daze.eu/fr/glossario/hybride-serie-parallele>.
- [17] P.Caillard, “Conception par optimisation d'une chaîne de traction électrique et de son contrôle par modélisation multi-physique”, Published 13 November 2015.
- [18] O. Briat, “Performances et fiabilité du stockage d’énergie pour le véhicule électrique et hybride”, PhD thesis, 2016.
- [19] H.S. Das, C.W. Tan, and A. Yatim, “Fuel cell hybrid electric vehicles: A review on power conditioning units and topologies”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 76:268–291, 2017.
- [20] Y. Tian, J. Ruan, N. Zhang, J. Wu, and P. Walker, “Modelling and control of a novel two-speed transmission for electric vehicles”, *Mechanism and Machine Theory*, 127:13–32, 2018.
- [21] C. Chan, “The state of the art of electric, hybrid, and fuel cell vehicles”, *Proceedings of the IEEE*, 95(4):704–718, 2007.
- [22] H. Fathabadi, “Novel fuel cell/battery/supercapacitor hybrid power source for fuel cell hybrid electric vehicles”, *Energy*, 143: 467–477, 2018.
- [23] <https://elwatan-dz.com>.
- [24] <https://www.algerie-eco.com>.
- [25] <https://www.axa.ch/fr/privatkunden/blog/en-deplacement/innovation/recharge-voiture-electrique.html>.
- [26] B.Blunier et A.Miraoui – Piles à combustible: principes, modélisation, applications, Paris Ellipses, 2009.
- [27] P. Stevens, F.Novel-Catin, A.Hammou, C.Lamy et M.Cassir – piles à combustible, techniques de l’ingénieur, traité de génie électrique, 2000.
- [28] M. Boudellah – la pile à combustible : structure, fonctionnement, Dunod, 2012.
- [29] F. Khatounian, “Contribution à la modélisation, l’identification et à la commande d’une interface haptique a un degré de liberté entraînée par une machine synchrone a aimants permanents”, Thèse de Doctorat de l’école normale supérieure de Cachan, 2006.
- [30] <https://www.h2-mobile.fr/dossiers/pile-combustible-fonctionnement-avantages-inconvenients>.

- [31] F. Ju, Q. Zhang, W. Deng et J. Li, "Review of structures and control of battery supercapacitor hybrid energy storage system for electric vehicles", Chez International Conference on Automation Science and Engineering (CASE), New Taipei, Taiwan, 2014.
- [32] <https://www.watteo.fr/comment-fonctionne-une-batterie-au-lithium>.
- [33] F. Mehazzem, "Contribution à la Commande d'un Moteur Asynchrone destiné à la Traction électrique", thèse de doctorat, École Doctorale ICMS, Université Paris-Est, 2010.
- [34] Z. Song, J. Li, J.Hou, H.Hofmann, M.Ouyang, and J.Du, "The battery-supercapacitor hybrid energy storage system in electric vehicle applications: A case study", *Energy*, 154:433–441, 2018.
- [35] B. Multon, "Motorisation des véhicules électriques", *Techniques de l'ingénieur*, N° E3996, 2001.
- [36] AVERE, "Outil et solution de mobilité urbaine individuelle et électrique", association véhicule électrique router européen, www.averse.org.
- [37] Z. Q. Zhu, D. Howe, "Electrical machines and drives for electric, hybrid and fuel cell vehicles", *Proceeding of the IEEE*, Vol. 95, N°4, pp. 746-763, April 2007.
- [38] A. Arif, "Amélioration des performances d'un véhicule électrique alimenté par une source photovoltaïque", thèse de doctorat, université Mohamed Khider-Biskra, Algérie, 07-11-2013.
- [39] D. Fodorean, "Conception et réalisation d'une machine synchrone à double excitation : application à l'entraînement direct", Thèse de doctorat, université de technologie de Belfort-Montbéliard, Université Technique de Cluj-Napoca, 2005.
- [40] J. Chatelain, "Machines électriques", Lausanne : Presses polytechniques romandes, 1989.
- [41] J. P. Caron & J. P. Hautier, "Modélisation et commande de la Machine Asynchrone", Edition Technip, Paris, France, 1995.
- [42] C. Canudas-de-Wit, "Commande des moteurs asynchrones - Tome 1 - Modélisation, contrôle vectoriel et DTC ", Edition Hermès Sciences/Lavoisier, France, 2000.
- [43] J. P. Louis, "Modélisation des machines électriques en vue de leur commande : Concepts généraux", *Traité EGEM, Série génie électrique*, Lavoisier, Paris, 2004.
- [44] R. N. Jazar, "Vehicle Dynamics: Theory and Application", Springer, 2008.
- [45] J. M. Miller, "Propulsion Systems for Hybrid Vehicles", London, The Institution of Engineering and Technology, 2008.
- [46] F.Khoucha, A.Khoudiri, M.Benbouzid, A.Kheloui, "Commande DTC d'une propulsion moteur asynchrone / onduleur multiniveaux asymétrique pour un véhicule électrique", *European Journal of Electrical Engineering* 14, pp. 237-254, 2011.

- [47] B.Multon, "Motorisation de véhicule électrique", Technique de ingénieur, Traité Électronique, E3996, 2001.
- [48] F. Khoucha, K.Marouani, A.Kheloui, M.E.H.Benbouzid, "A Sensorless Direct Torque Control Scheme Suitable for Electric Vehicles", Electromotion 16, pp. 89-97, 2009.
- [49] B. Gasbaoui, A. Chaker, A. Laoufi, B.Allaoua, A.Nasri, "The Efficiency of Direct Torque Control for Electric Vehicle Behavior Improvement", Serbian Journal Of Electrical Engineering, pp. 227-246, 2011.
- [50] A. Nasri, A. Hazzab, I.K. Bousserhane, S. Hadjeri, P.Sicard, "Fuzzy-Sliding Mode Speed Control for Two Wheels Electric Vehicle Drive", Serbian journal of electrical engineering, pp. 227-246, 2009.
- [51] B. Multon, L. Hirsinger, "Problème de la motorisation d'un véhicule électrique", revue 3EI, pp. 55-64, 1996.
- [52] Technical specifications for the e-up Volkswagen electric car, 2017 model (<http://www.volkswagen.fr/fr/models/up/documentation.html>).
- [53] T. Markel, et al. 2003. « Energy Storage System Requirements for Hybrid Fuel Cell Vehicles ». In Advanced Automotive Battery Conference. (Nice, France, June 10-13, 2003).
- [54] Pukrushpan, A. Stefanopoulou, and H. Peng, Control of fuel cell power systems: principles, modeling, analysis, and feed back design, ser. Advances in industrial control. Springer, 2004.
- [55] M.T. Latreche, "Commande Floue de la Machine Synchrone à Aimant Permanent (MSAP) utilisée dans un système éolien", Thèse de doctorat. Université de Sétif 1-Ferhat Abbas, 2012.
- [56] I. Takahashi and T. Noguchi, "A New Quick Response and High Efficiency Control Strategy of Induction Motor", IEEE Trans. Ind. Electron, IE-22, Sept /Oct 1986.
- [57] I. Takahashi and S. Asakawa, "Ultra-Wide Speed Control of Induction Motor Covered 10A6 range", IEEE Trans Ind Applicat, IA-25, pp. 227-232, 1987.
- [58] A. Dissa, "Contrôle direct du couple du moteur à induction sans capteur de vitesse associée a un observateur non linéaire", Thèse de Magister en Electrotechnique, Université de Batna, Algérie, 2009.
- [59] H. Bensaadi, "Commande DTC-SVM d'une Machine Synchrone à Aimants Permanents", Thèse de Magister en Electrotechnique, Université de Batna, Algérie, 2012.
- [60] B. Fornel, "Techniques de l'ingénieur", D3 623.

- [61] A. Amour, "Commande sans capteur de vitesse par DTC d'une machine synchrone à aimants permanents dotée d'un observateur d'ordre complet à mode glissants", thèse de Magister en Electrotechnique, Université de Batna, 2005.
- [62] A. Chikhi, "Commande direct du moteur asynchrone-Apport de la Logique floue", Mémoire de Magister, Université de Batna, 2008.
- [63] A. Benaiad, "Comparaison des performances d'un régulateur PI classique et PI floue pour la commande direct du couple", Mémoire de master, Université de Béchar, 2013.
- [64] L. L. Hoang, "Comparison of field-oriented control and direct torque for induction Motor drives", Industry Applications Conference. Thirty-Fourth IAS Annual Meeting, of the IEEE. Vol. 2, 1999.
- [65] D. Casadei, F. Profumo, G. Serra, A. Tani, "FOC and DTC: Two viable schemes for induction Motors torque control", Power Electronics, IEEE Transactions, Vol. 17, sept 2002.
- [66] D. Casadei, G. Grandi, G. Serra, A. Tani, "Effects of flux and torque hysteresis band in direct torque of induction machines", Industrial Electronics, Control and Instrumentation, IECON apos, Vol. 1, sept 1994.
- [67] J. Belhadj, "Commande Directe en Couple d'une Machine Asynchrone- Structures d'observation - Application aux systèmes multi machines multiconvertisseurs" Thèse de Doctorat Université de Tunis El-Manar, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis, 2001.
- [68] A. Meroufel, "Contrôle de la machine asynchrone : commande scalaire, commande vectorielle et commande directe du couple", Université Djillali Liabès -Sidi Bel-Abbès, 2008-2009.
- [69] A. M. A. Hissel, "Contrôle directe du couple électromagnétique des machines asynchrones de grande puissance", Thèse de Doctorat ENSEEIHT Toulouse, France, 1999.
- [70] K. Nabti, "Contribution à la commande de la machine asynchrone par DTC et logique floue", thèse de magister L'Université Mentouri de Constantine, Juin 2006.
- [71] B. Mokhtari, "Implantation de la DTCF par des techniques de l'intelligence artificielle neuronale et neuro- floue : application à la machine asynchrone alimenté par des onduleurs de tension a deux et a trois niveaux", Thèse de Magister en Electrotechnique, Université de Batna, Algérie, 2002.
- [72] B.Vural, A. R. Boynuegri, I. Nakir, O. Erdinc, A. Balikci, M. Uzunoglu, H. Gorgun, and S. Dusmez, "Fuel cell and ultra-capacitor hybridization: A prototype test bench based analysis of different energy management strategies for vehicular applications", International Journal of Hydrogen Energy, vol. 20, n. 35, p. 11161-11171, 2010.

[73] Adem Siraj Mohammed, Samson Mekbib Atnaw, Ayodeji Olalekan Salau, Joy Nnenna Eneh, Review article: “Review of optimal sizing and power management strategies for fuel cell/battery/super capacitor hybrid electric vehicles”, Energy Reports 9, 2023.

[74] Ameen M. Bassama, Alexander B. Phillipsc, Stephen R. Turnocka, Philip A. Wilsona, “An Improved Energy Management Strategy For A Hybrid Fuel Cell/Battery Passenger Vessel”, International Journal of Hydrogen Energy, Email address: ab2e12@soton.ac.uk, August 24, 2016.