

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université A.MIRA-BEJAIA



Faculté de Technologie
Département de Génie Electrique

Projet fin d'étude Pour l'obtention du diplôme de Master en Electrotechnique

Thème

**Véhicule électrique à base d'un moteur synchrone
à aimants permanents double étoile**

Préparé par :

CHELGHOUM Mustapha (CE),
HADDAD Rabah (ME).

Promoteur

Dr. REMLI Aziz,

Co-promoteur

Pr. AOUZELAG Djamel

Année Universitaire : 2018/2019

Remerciements

Avant tout, nous remercions Dieu tout puissant de nous avoir accordé le courage et la patience pour réaliser ce travail.

Nous tenons à remercier notre promoteur Mr REMLI, Aziz et notre Co-promoteur Mr AOUZELLAG Djamal d'avoir suivi notre travail et ses conseils avisés, ainsi Mr TAZRRART et AZIB pour leur disponibilité.

Ainsi, notre famille et nos amis d'avoir été présent à nos côtés.

Nous souhaitons aussi remercier toutes les personnes qui de près ou de loin, ont permis à l'aboutissement de ce travail.

Nous remercions les membres du jury d'avoir accepté d'examiner notre travail.

Dédicaces

Je dédie ce travail à :

A la mémoire de mon grand-père "Mustapha".

A ma très chère et généreuse Grande mère "Baya".

Mes parents.

Mes frères et sœurs.

Mes amis.

Je tiens à remercier mon binôme pour le travail fournis,

Et ma future femme C.I.

Je tiens aussi à remercier mon parrain d'étude supérieur

Le Pr. Boudissa, Rabeh.

CHELGHOUM, Mustapha

Dédicaces

Je dédie ce travail à :

Mes parents

Mes frères

Mes amis.

Je tiens à remercier mon binôme pour le travail fournis,

Et la duchesse V.

HADDAD, Rabah

SOMMAIRE

Table des matières

Liste des symboles

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale.....	1
Chapitre I : Etat de l'art du véhicule électrique	
I.1 Introduction.....	4
I.2 Historique.....	4
I.3 Véhicule électrique.....	5
I.4 Classification et architecture d'un véhicule électrique.....	7
I.4.1 Moteur à roue.....	7
I.4.2 Moteur fixé au châssis.....	8
I.5 Motorisation de la chaîne de traction.....	9
I.5.1 Moteur à courant continu (MCC).....	9
I.5.2 Moteur synchrone à rotor bobiné (MSRB).....	9
I.5.3 Moteur synchrone à reluctance variable (MSRV).....	10
I.5.4 Moteur asynchrone à cage d'écureuil (MASCE).....	10
I.5.5 Machine asynchrone à double étoile (MASDE)	10
I.5.6 Machine asynchrone à double alimentation (MADA).....	11
I.5.7 Moteur synchrone à aimants permanents (MSAP).....	11
I.6.1 Constitution de la machine synchrone à aimants permanents	11
I.6.2 Les aimants permanents	12
I.6.3 Les aimants à terre rares.....	14
I.6.4 Différentes structures de la MSAP.....	14

Table des matières

I.7 Moteur synchrone à aimant permanent double étoile (MSAPDE).....	17
I.7.1 Avantages et inconvénients des MSAPDE.....	18
I.8 Choix des moteurs électriques	18
I.9 Avantages et inconvénients de la voiture électrique.....	19
I.10 Système de propulsion.....	20
I.11 Source d'énergie.....	21
I.11.1 Batterie Plomb-acide.....	21
I.11.2 Batteries Nickel-Cadium.....	21
I.11.3 Batterie Sodium-Chlorure de Nickel (ZEBRA).....	21
I.11.4 Batteries Lithium-métal Polymère.....	22
I.11.5 Batterie Lithium-ion	22
I.11.6 Batterie Nickel-métale hydrure.....	22
I.12 Critères de sélection	22
I.13 Supercondensateur	24
I.13.1 Avantages et inconvénients du supercondensateur	25
I.13.2 Applications du supercondensateur dans l'automobile.....	25
I.14 Freinage récupératif	26
I.15 Conclusion	26
Chapitre II : Modélisation des différents éléments du véhicule électrique	
II.1 Introduction	28
II.2 Topologie de la chaîne de traction.....	28
II.3 Technologie du pneumatique.....	29
II.4 Dynamique du véhicule et transmission de puissance.....	30

Table des matières

II.4.1 Dynamique du véhicule.....	31
II.4.2 Force de roulement.....	32
II.4.3 Force dûe au profile de la route	33
II.4.4 Force de résistance aérodynamique	34
II.4.5 Force dûe à l'accélération	35
II.5 Eléments basique du cahier des charges.....	36
II.6 Résultats de simulation	37
II.7 Description et modélisation de la machine.....	38
II.7.1 Description de la machine synchrone double étoile.....	38
II.7.2 Modélisation de la machine synchrone double étoile	39
II.7.3 Mise en équations de la MSDE dans le repère (abc).....	40
II.7.4 Modèle biphasé de la MSAPDE.....	43
II.8 Autopilotage	47
II.8.1 Résultats de simulation de l'autopilotage	48
II.9 Alimentation de la MSAPDE par un onduleur de tension à commande MLI.....	50
II.9.1 Modélisation de l'onduleur	50
II.10 Convertisseur de puissance (Hacheur élévateur-abaisseur ou buckboost).....	52
II.11 Source d'énergie	52
II.11.1 Batterie chimique	52
II.11.2 Modéisation et simulation de la batterie Lithium-ion	53
II.11.2.1 Modélisation du pack à partir du modèle unitaire	54
II.11.2.2 Résultats de simulation	54
II.11.3 Modélisation et simulation du pack des supercondesateurs.....	55

Table des matières

II.11.3.1 Modélisation d'une cellule élémentaire de supercondensateur.....	55
II.11.3.2 Modélisation du pack de supercondensateur.....	57
II.11.3.3 Résultats de simulation	58
II.12 Conclusion	59
Chapitre III : contrôle et gestion d'énergie du véhicule électrique	
III.1 Introduction	60
III.2 Principe de la commande vectorielle de la MSAPDE.....	60
III.2.1 Technique de découplage.....	61
III.2.2 Découplage par compensation.....	62
III.2.3 Régulateurs des courants.....	63
III.2.4 Régulateur de vitesse.....	65
III.3 Résultat de simulation et interprétation.....	66
III.4 Evolution des systèmes de stockage dans les véhicules électriques.....	67
III.4.1 Batteries lithium-ion	67
III.4.2 Problématiques liées aux batteries	69
III.5 L'hybridation dans les stockeurs.....	72
III.5.1 Pourquoi l'hybridation ?.....	72
III.5.2 Énergie Vs Puissance : batterie ou super condensateur ?.....	72
III.5.3 Principe d'hybridation des sources d'énergie	73
III.6 Modèle énergétique du stockage d'énergie par batterie HE.....	74
III.6.1 Assemblage de la batterie en module, en pack.....	76
III.6.2 Critères énergétiques et dimensionnement.....	77
III.6.3 Dimensionnements des supercondensateurs.....	78

Table des matières

III.6.4 Méthode de dimensionnement des supercondensateurs.....	78
III.6.5 Quand il faut récupérer de l'énergie cinétique.....	81
III.7 Dimensionnements des batteries.....	82
III.8 Structure de la source hybride.....	84
III.8.1 Architecture de la source hybride.....	84
III.8.2 Stratégies de gestion à base de règles.....	87
III.8.3 Stratégies à base d'optimisation.....	87
III.9 Problématique de l'optimisation de la gestion d'énergie.....	88
III.9.1 Contraintes électriques à base de règles (contrôle haut niveau).....	89
III.9.2 Résultats et interprétation de la simulation de la source hybride.....	91
III.10 Conclusion.....	94
Conclusion générale	95

Liste des figures

Chapitre I Etat de l'art du véhicule électrique

Figure : I.1 : La jamais contente atteint 105 km/h	5
Figure : I.2 : Caractéristiques couple-vitesse	6
Figure : I.3 : Schéma simplifié de la chaine de traction	7
Figure : I.4 : Exemples de roue englobant un moteur-roue	8
Figure : I.5 : Voiture avec un moteur fixé au châssis	8
Figure : I.6 : Machines synchrones à aimants permanant	12
Figure : I.7 : Courbe de désaimantation	13
Figure : I.8 : Courbes de désaimantation des principaux types d'aimants	13
Figure : I.9 : types de flux de la MSAP.....	14
Figure : I.10 : Exemple de structures à rotor interne et à rotor externe	15
Figure :I.11 : Machine synchrone à aimants permanents montés en surface	15
Figure : I.12 : Machine synchrone à aimants permanents insérés	15
Figure : I.13 : Machine synchrone à aimants permanents chapeautés	16
Figure : I.14 : types de structure de la MSAP	16
Figure : I.15 : différents structures à flux axial	17
Figure : I.16 :Fonctionnement d'un supercondensateur	24

Chapitre II Modélisation des différents éléments du véhicule électrique

Figure : II.1 : Topologie de la chaine de traction.....	29
Figure : II.2 : Construction du pneumatique.....	30
Figure : II.3 : Ensembles des forces agissent sur le véhicule.....	32
Figure : II.4 : Les forces du roulement sur la roue.....	32
Figure : II.5 : La pente sur la route.....	33

Liste des figures

Figure : II.6 : Force aérodynamique en fonction de la vitesse pour différentes valeurs du C_x ...	34
Figure : II.7 : Schéma de la chaîne de traction.....	36
Figure : II.8 : Résultats de simulation de la charge dynamique brute.....	37
Figure : II.9 : Représentation schématique des enroulements de la MSAPDE.....	38
Figure : II.10 : La représentation schématique de la machine dans le repère (d,q).....	44
Figure : II.11 : Couple électromagnétique et vitesses mécanique	48
Figure : II.12 : Tension et courants de la 1er et 2eme étoile	48
Figure : II.13 : Tension et courants d'une phase de 1er et 2eme étoile	49
Figure : II.14 : Puissance du moteur	49
Figure : II.15: Les courants quadrature et direct de la 1ere et 2eme étoile.....	49
Figure : II.16: Schéma d'un onduleur triphasé.....	51
Figure : II.117: Résultats de simulation du Pack de batterie.....	55
Figure : II.18: Model d'un élément du Sc.....	55
Figure : II.19: Résultats de simulation des supercondensateurs.....	58

Chapitre III Contrôle et gestion de l'énergie du véhicule électrique

Figure : III.1: Machine à courant continue.....	61
Figure : III.2: Illustration du découplage	62
Figure : III.3 principe de régulation	63
Figure : III.4: : principe de régulation du courant i_{d1}	64
Figure : III.5 principe de régulation de vitesse	65
Figure : III.6: résultat de simulation de la commande vectorielle	67
Figure : III.7: Principe d'équilibrage dissipatifs	69
Figure : III.8: Principe d'équilibrage redistributif	69

Liste des figures

Figure : III.9: Diagramme de Ragone	70
Figure : III.10: Dégradation des performances d'une batterie lors du vieillissement.....	71
Figure : III.11: Différentes architecture d'hybridation des sources	72
Figure : III.12 Principe d'hybridation des sources de stockage hybrides.....	73
Figure : III.13: Architecture du pack batteries (série/parallèle)	74
Figure : III.14: Evolution de la tension à vide en fonction du SOC pour une cellule.....	76
Figure : III.15: convertisseur DC/DC	83
Figure : III.16: Topologies des convertisseurs permettant l'association batterie/supercondensateur	84
Figure : III.17: Association des convertisseurs DC/DC	85
Figure : III.18 : Phase active	86
Figure : III.19 : Phase de roue libre	86
Figure : III.20 : Organigramme des règles de gestion d'énergie	91
Figure : III.21 : Coutant de bus DC	91
Figure : III.22 : Courant et tension SC et la batterie	92
Figure : III.23 : Cycle de charge et décharge des SC	92
Figure : III.24 : Tension du bus et sa référence	92
Figure : III.25 : Puissance des SC, du pack batterie et la puissance demandé	92
Figure : III.26 : courant et tension supercondensateurs et batteries	92

Liste des symboles

$m_{\text{véh}}$: Masse du véhicule ;

$v_{\text{véh}}$: Vitesse de la voiture ;

F_{trac} : Forces de traction fournie par les sources d'énergie;

F_{resist} : Force de résistance ;

F_{frein} : Force provenant du freinage ;

P_v : Puissance à la roue ;

C_T : Couple de traction ;

Ω_r : Vitesse de rotation de la roue ;

F_T : Forces de traction du véhicule ;

E_V : Energie nécessaire au déplacement du véhicule ;

f_r : Coefficient de frottement ;

C_r : Coefficient de résistance ;

F_{prof} : force due au profile de la route ;

F_{aero} : force de résistance aérodynamique ;

S_f : section frontale ;

$[V_{abc}]_{s1}$: Vecteur des tensions de l'étoile 1 ;

$[V_{a'b'c'}]_{s2}$: Vecteur des tensions de l'étoile 2 ;

$[V_f]_r$: Tension triphasées rotoriques ;

$[R_{s1,s2}]$: résistance statorique de la 1^{er}/2^{eme} étoile ;

$[R_f]$: résistance rotorique ;

$[i_{abc}]_{s1,s2}$: Courants triphasées statoriques (étoile 1 et 2) ;

$[i_f]$: Vecteur des courants du rotor ;

$[\varphi_{abc}]_{s1,s2}$: Flux statorique (1^{er}/2^{ème} étoile)

$[\varphi_f, r]$: Flux rotorique ;

$[L_S(\theta)]$: Matrice d'Inductance statorique ;

Liste des symboles

$[M_{sr}(\theta)]$: La matrice des inductances mutuelles entre le premier stator et le rotor ;

L_s, L_f : Inductance propre des enroulements statoriques et rotorique respectivement ;

M_s : Inductance mutuelle entre les deux enroulements statoriques ;

M_{sf} : Inductance mutuelle entre les enroulements statoriques et rotorique;

M_{fd} : Inductance mutuelle entre les enroulements rotorique ;

J : Inertie totale des parties tournantes ;

K_f : Coefficient de frottement ;

Ω : Vitesse de rotation rotorique de la machine;

C_{em} : Couple électromagnétique. ;

C_r : Couple résistant (couple de charge) ;

$[p(\theta_{s1})]$: Matrice de transformation de Park ;

$[p(\theta_{s2})]$: Matrice de transformation du deuxième stator ;

$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix}_{s1}$: Les tensions directe et quadrature pour le stator 1 dans le repère (d,q) ;

$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix}_{s2}$: Les tensions directe et quadrature pour le stator 2 dans le repère (d,q) ;

$[V_f]_r$: L'enroulement inducteur ;

L_d : est l'inductance direct;

L_q : est l'inductance en quadratique;

$\phi_{dr,qr}$ Flux rotorique dans le référentiel de Park (d,q) ;

M_d : est la mutuelle inductance entre les enroulements d_1 et d_2 ;

M_q : Est la mutuelle inductance entre les enroulements q_1 et q_2 ;

Liste des symboles

V : Voltage actuel de la batterie ;

E_0 : Voltage constant de la batterie ;

K : Résistance de polarisation ;

Q : capacité maximale de la batterie ;

it : Charge actuelle de la batterie ;

R : résistance interne de la batterie ;

i : courant de la batterie ;

A : Amplitude de la tension de la zone exponentielle ;

B : Inverse de la capacité de la zone exponentielle ;

$SOC(t)$: État de charge de la batterie à l'instant t ;

SOC_{unit} : État de charge à l'état initial ;

I_b : Courant de décharge de la batterie ;

Q : Charge nominale de la batterie ;

$\int_{t_0}^t I_b dt$: Charge délivrée par la batterie à l'instant t (charge actuelle) ;

V_{cb}, R_{cb}, Q_{cb} : Respectivement la tension, la résistance interne et la capacité d'une cellule ;

V_{bat} : Tension de la batterie ;

V_{sc} : Tension du supercondensateur ;

PI : Régulateur proportionnelle intégrale ;

L_d : Inductance suivant l'axe d ;

L_q : Inductance suivant l'axe q ;

I_{d1} : Le courant statorique de l'axe d ;

I_{d2} : Le courant statorique de l'axe d ;

I_{q2} : Le courant statorique de l'axe q ;

W_m : Vitesse mécanique ;

W_e : Vitesse électrique ;

P : Nombre de pair de pôles ;

P : Transformation de Park ;

Liste des symboles

W_{ref} : Vitesse de référence ;

i_{dref} : Courant de référence ;

$K_{pd}K_{id}$: Coefficient de régulateur PI ;

θ : position angulaire du rotor par rapport au stator ;

RST: coefficients de régulateur ;

Esc : energie du supercondensateur ;

E_{bat} : energie du la batterie ;

Esc(cellule) : : energie d'une cellule supercondensateur ;

Esc(pack) : energie du pack supercondensateur ;

Esc_(max)(pack) : energie max du pack supercondensateur ;

N_s : Le nombre de cellule de batterie ou de supercondensateur en série ;

N_p : Le nombre de cellule de batterie ou de supercondensateur en parallèle ;

N_{bat} : Nombre de batteries ;

N_{bp} : Nombre de batteries parallèle ;

N_{bs} : Nombre de batteries série ;

PBus : puissance le bus ;

PBatt : puissance des batteries

Psc :puissance des supercondensateurs

Liste Des Tableaux

Chapitre I : Etat de l'art du véhicule électrique

Tableau I.1 : Comparaison pour le choix du moteur.....19

Tableau I.2 : Comparaison pour le choix de la batterie.....23

Chapitre II : Modélisation des différents éléments du véhicule électrique

Tableau II.1 : Cahier des charges du véhicule électrique.....37

Chapitre III : contrôle et gestion d'énergie du véhicule électrique

Tableau III.1: Flux énergétiques.....89

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

À la fin du 19^{ème} siècle est apparue une invention technologique majeure qui a considérablement modifié les sociétés de nombreux pays au cours du 20^{ème} siècle. Cette invention n'est autre que le véhicule (automobile). À l'origine, l'automobile a d'abord été à propulsion électrique, mais avec la découverte de nombreux puits de pétrole, le véhicule à moteur thermique s'est rapidement imposé au début du 20^{ème} siècle. Ce véhicule utilise donc le pétrole comme vecteur d'énergie. L'automobile s'est ainsi progressivement imposée dans les pays développés comme le principal mode de transport pour la circulation des individus et des marchandises. Son industrie a été l'un des secteurs les plus importants et les plus influents depuis la fin de la seconde guerre mondiale et son essor mondial a été spectaculaire [1]. Malgré le développement de la voiture et la place qu'elle occupe au sein de la société, elle fait toute fois l'objet de critique importante surtout dans cette conséquence environnementale. L'automobile doit faire face désormais à la raréfaction de cette énergie et à la pollution causée par celle-ci.

Le secteur des transports est soumis à des problématiques environnementales fortes, de plus en plus étudiées et quantifiées, notamment ses impacts sur la qualité de l'air et le réchauffement climatique, avec des conséquences sociétales et géopolitiques non négligeables. Dans ce contexte, la propulsion électrique offre une solution sans émission à l'usage, avec l'opportunité d'être alimentée par une énergie électrique qui devient renouvelable et permet une production locale. Ce véhicule électrique, solution « idéale », est pourtant présent depuis les débuts de l'automobile. Toutefois, il souffre de limites principalement liées à l'autonomie et au coût de fabrication en comparaison avec des véhicules thermiques. Depuis l'année 2010, un nouvel élan, cette fois durable, est apporté à la mobilité électrique par le développement des batteries Li-ion, avec des perspectives d'autonomie entre 300 km et 500 km en fonction des véhicules dès 2017, et un coût en baisse continue de plus en plus proche du véhicule à combustion dont le durcissement des normes antipollution engendre des coûts d'achat et d'entretien supplémentaires.

La chaîne de traction qui tracte ces véhicules est un levier majeur d'amélioration, aussi bien au niveau du coût que de l'autonomie. Dans le cadre de ce travail de recherche, nous nous concentrerons sur la phase de conception amont de la chaîne de traction, étape qui permet un pré dimensionnement des organes en faisant des choix importants sur ses composants : transmission, machine électrique, électronique de puissance et batterie. Ces composants forment un système à part entière avec leurs interactions respectives. La conception de ces composants séparément ne garantit pas qu'une fois assemblée, ils formeront

Introduction générale

une chaîne de traction performante pour nos critères. De ce constat se dégagent des problématiques qui seront le point de départ de notre travail : comment concevoir une chaîne de traction électrique d'un point de vue système, c'est-à-dire en travaillant directement sur l'autonomie du véhicule plutôt que sur les pertes des organes séparément ? L'enjeu est donc de pouvoir intégrer les interactions entre les composants, les lois de contrôle inhérentes à certains organes ou encore les contraintes physiques de chaque composant. Comment intégrer l'ensemble de ces éléments dans le cadre d'une optimisation qui permettra d'établir les meilleurs compromis en termes de coût et d'autonomie ? [2]

L'idée de construire une machine possédant un rotor et deux étoiles au stator a vu le jour. En effet, la machine synchrone double étoile est née, elle se vante d'être fiable, robuste avec un bon rendement et répondant, avec excellence, aux critères de performances, comparée à la machine simple étoile. Elle permet de réduire les ondulations du couple électromagnétique, de limiter les harmoniques de courant, d'améliorer le facteur de puissance et de fonctionner à demi-régime [2]-[3]. Lors d'une défaillance d'une phase ou de sa perte, de deux phases ou d'une étoile, la machine multiphasée continue à tourner, permettant une marche en mode dégradé.

Afin de présenter le travail réalisé, ce manuscrit sera articulé en trois chapitres.

Dans le premier chapitre introductif, nous présenterons l'état de l'art du véhicule électrique, Ainsi, nous commencerons par l'historique du développement de la voiture électrique, de ses origines à nos jours. Nous synthétiserons ensuite des études menées sur ce type de véhicule dans le but de rendre compte des enjeux de son adoption pour l'individu.

Dans le second chapitre, nous étudierons la modélisation des différents éléments de la chaîne de traction, ainsi une topologie de la chaîne de traction, nous ferons aussi une mise en situation de quelques cas essentiels afin de déterminer les exigences fonctionnelles du véhicule en matière de puissance, une fois le profil de puissance établi vient le choix des convertisseurs (DC/AC) qui se fera selon le pic de puissance et finira par une étude et un dimensionnement des sources d'énergie. [4]-[5]

Nous présenterons des résultats du contrôle et la gestion des flux de puissance et d'énergie sur différents jeux de variables et algorithmes dans le dernier chapitre. L'analyse des résultats fera ressortir la pertinence d'un contrôle du système et permettra d'établir comment résoudre efficacement notre problème avec des temps de calcul compatibles avec les besoins. Enfin

Introduction générale

nous présenterons des validations par simulation numérique effectuées sur la machine avec le logiciel MATLAB.

CHAPITRE I

I.1 Introduction

Le véhicule tout électrique est réapparu ces derniers temps comme une solution potentielle au remplacement du véhicule thermique. Même s'il n'est pas encore en mesure de s'imposer sur le marché des véhicules particuliers, il reste sans conteste une bonne solution, mais à la condition de disposer d'une source d'énergie embarquée performante. Les avantages d'un véhicule électrique sont clairement à découvert notamment sur plusieurs plans que soit écologiques (réduction des émissions des gaz à effet de serre), qui est un avantage majeur contribuant au ralentissement du réchauffement climatique, ou efficacité puisque la voiture électrique offre un meilleur rendement énergétique par rapport à une voiture conventionnelle. A noter qu'au niveau de la commande, un véhicule électrique permet un meilleur contrôle des performances. Son principal inconvénient se trouve au niveau de l'autonomie, en effet, les performances des véhicules actuels se trouvent très limitées en termes d'autonomie en utilisant la seule énergie électrique des batteries. Cette énergie est utilisée pour alimenter un ou plusieurs moteurs électriques de traction selon l'architecture choisie par le constructeur. Ce premier chapitre présente les véhicules à traction électrique. Après un rappel historique sur l'évolution chronologique du véhicule électrique, on présentera quelques architectures utilisées, les machines qui peuvent pousser le véhicule tout en soulignant les sources d'énergie nécessaires à son alimentation.

I.2 Historique

L'idée d'utiliser l'énergie électrique pour mouvoir des véhicules est loin d'être nouvelle. Depuis fort longtemps, les premières voitures sans chevaux ont été propulsées en grande partie par des moteurs électriques. En effet, c'est en 1835 que Sitrandus Straitingh a mis au point une voiture électrique expérimentale [5].

En 1880 les ingénieurs Charles Jeantaud, Camille Faure, Gustave Trouvé et Nicolas Raffard réalisent les premiers véhicules électriques. Cette prouesse technologique est rendue possible grâce à l'invention, vingt et un ans plus tôt, et à l'amélioration durant la même période de l'accumulateur au plomb par Gaston Planté et Camille Faure [5].

En 1896, Louis Krieger, un autre ingénieur français, créa un « fiacre » électrique qui participa avec succès au premier concours de parcours en ville : 12 jours de circulation et 50 km par jour. Mais c'est en mai 1899 que la viabilité de la voiture électrique éclate aux yeux

du monde entier. En effet, la Jamais Contente (Figure I.1), pilotée par le Belge Camille Jenatzy, dépassa les 105 km/h [5].

Quelques années plus tard, en 1901, de nouveau Krieger, avec une voiture électrique emportant trois voyageurs, portait le rayon d'action à 307 km en reliant Paris à Châtellerauld, sans recharge, à une moyenne horaire de 40 km [5].

En 1903 déjà l'électro mobile, muni d'une remorque de batteries, disposait, d'une autonomie de 375 km. Cependant, ces performances ne donnaient pas la mesure réelle de la voiture électrique parce qu'elles étaient réalisées avec des matériaux spéciaux et sans souci de ménager les batteries d'accumulateurs [6].

Lorsqu'on passa aux applications pratiques, on s'aperçut que l'on était limité à la fois par la vitesse moyenne et par le rayon d'action, les accumulateurs devant être normalement rechargés tous les 100 à 150 km. En outre, le rapport poids/puissance qui détermine en partie la valeur des accélérations était trop élevé. La figure I.1 illustre le premier VE à atteindre 105 km/h [5].

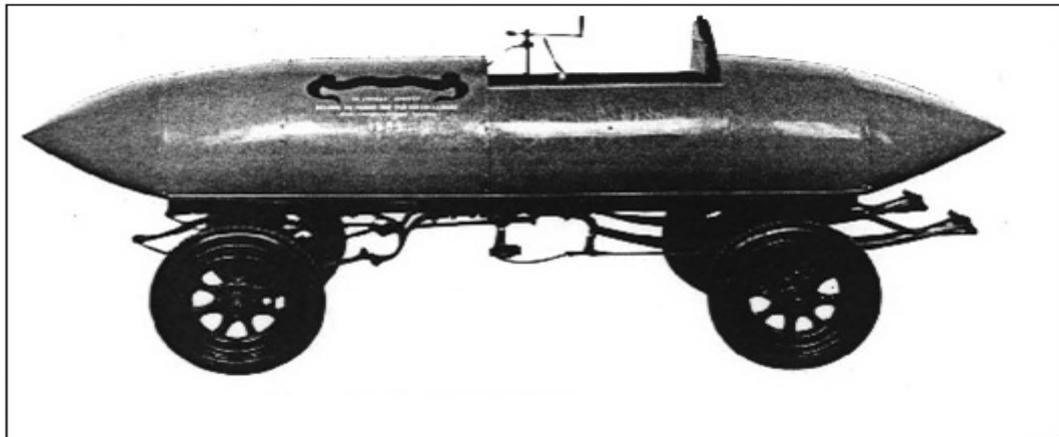


Figure : I.1 : La jamais contente atteint 105 km/h [5].

I.3 Véhicule électrique

Le système de propulsion électrique est le cœur des véhicules électriques et hybrides. Ils se composent des moteurs électriques, de convertisseurs de puissance et de leurs contrôles/commandes. Le moteur électrique est utilisé pour convertir l'énergie électrique qui provient de la source d'énergie mécanique utilisée pour propulser le véhicule ou inversement pour permettre la récupération d'énergie pendant le freinage. Lors du freinage, la chaîne mécanique devient en partie la source de puissance, et la source d'énergie principale devient

le récepteur. On peut dire alors que la voiture électrique est composée de trois principaux éléments :

- Le moteur ;
- L'électronique ;
- Source d'énergie ;

La solution la plus simple pour réaliser un véhicule électrique est de le construire sur la base d'un véhicule thermique existant, en remplaçant le moteur thermique par un moteur électrique. Cependant, la transmission mécanique peut être simplifiée. La capacité des moteurs électriques à démarrer à couple élevé et de fonctionner sur une large plage de vitesse, cela rend possible l'élimination de l'embrayage, voir même de la boîte de vitesses (Figure I.2) [7].

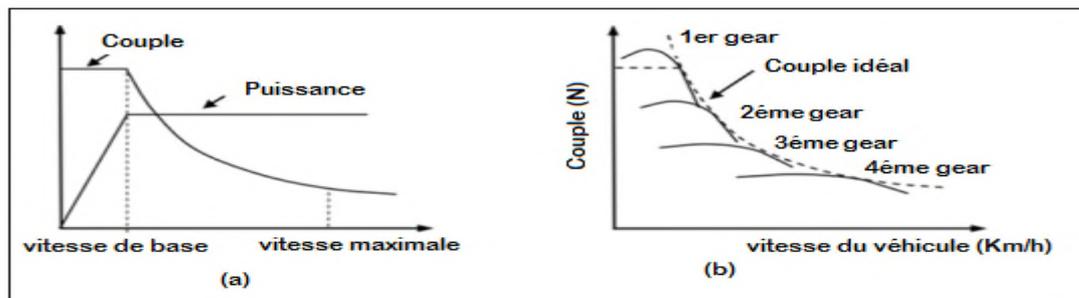


Figure I.2 : Caractéristiques couple-vitesse : (a) d'un moteur électrique ; (b) d'un moteur à combustion avec système d'engrenages à 4 rapports. [7]

Par contre, comme le couple est une grandeur dimensionnée, l'absence de boîte de vitesse implique un moteur plus lourd, plus encombrant et donc plus coûteux. Aussi, pour réduire la masse embarquée, les VE peuvent être conçus avec un réducteur qui permet au moteur électrique de travailler à grande vitesse. Ce réducteur permet de réduire la taille du moteur grâce à la réduction du couple demandé. Cette chaîne de traction centrée autour d'un seul moteur de traction couplé à un réducteur à rapport fixe représente la solution dite classique pour l'architecture des VE. La chaîne de traction classique d'un VE comprend donc, la source d'énergie, le convertisseur, le moteur électrique, la transmission mécanique englobant le différentiel et les roues comme le montre la figure I.3.

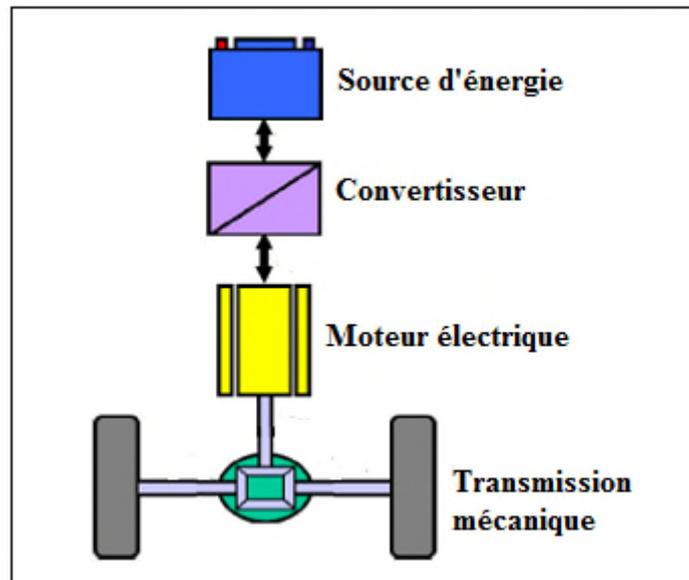


Figure I.3 : Schéma simplifié de la chaîne de traction.

I.4 Classifications et architectures d'un véhicule électrique

Selon la disposition du moteur électrique, les constructeurs automobile exploitent le principe du moteur roue ou du moteur fixé au châssis.

I.4.1 Moteur roue

Le moteur-roue est un ensemble qui comprend un moteur incorporé dans une roue, lequel est capable de propulser un véhicule. L'avantage principal d'un tel système est son encombrement réduit et le fait qu'il ne nécessite pas de transmission. La chaîne de traction tout électrique présentée par la figure.I.3 peut être encore simplifiée en utilisant un moteur pour chaque roue motrice. Ainsi, le différentiel classique est remplacé par un différentiel électrique réalisé par un contrôle indépendant de chaque moteur. Au moins deux configurations peuvent être envisagées pour le moteur roue : avec réducteur ou à entraînement direct [8]-[9].

La figure I.4.a représente un moteur-roue avec réducteur. Le constructeur intègre dans une roue un moteur électrique de traction, un frein à disque et une suspension électronique active située dans l'axe vertical de la roue. Très compacte, cette architecture nouvelle influe énormément sur celle du véhicule, Figure.I.3,Schéma simplifié de la chaîne de traction qui n'a plus besoin de moteur, de boîte de vitesses, d'embrayage, de cardans, d'arbres de transmission, mais aussi d'amortisseurs et de barres antiroulis. En plus, elle agit telle une

suspension active modifiant à tout instant l'assiette du véhicule pour assurer la tenue de route la mieux adaptée.

En ce qui concerne le moteur-roue sans réducteur figure I.4.b, les constructeurs présentent un nouveau concept d'entraînement : un moteur électrique intégré dans la roue et doté d'un système de suspension et d'amortissement. Ils sont parvenus à améliorer la sécurité et le confort en « suspendant » le moteur par quatre ressorts et deux amortisseurs et ainsi résoudre les problèmes de poids des parties tournantes nuisibles à la tenue de route.

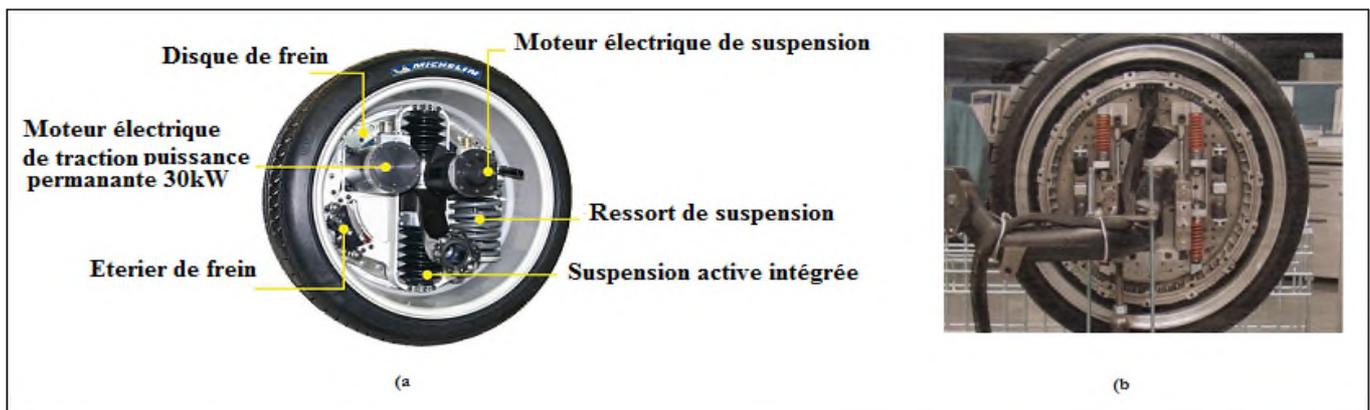


Figure I.4 : Exemples de roue englobant un moteur-roue : a) Roue active de MICHELIN ;
b) Roue motrice nouvelle génération BRIDGESTONE. [10]

I.4.2 Moteur fixé au châssis

Il existe plusieurs architectures telles que les VE bimoteur qui utilisent deux moteurs de traction à moindre puissance qu'une architecture monomoteur figure I.5, chacune de ces architectures présentes des avantages et des inconvénients sur lesquels se repose le constructeur pour leur choix [10].

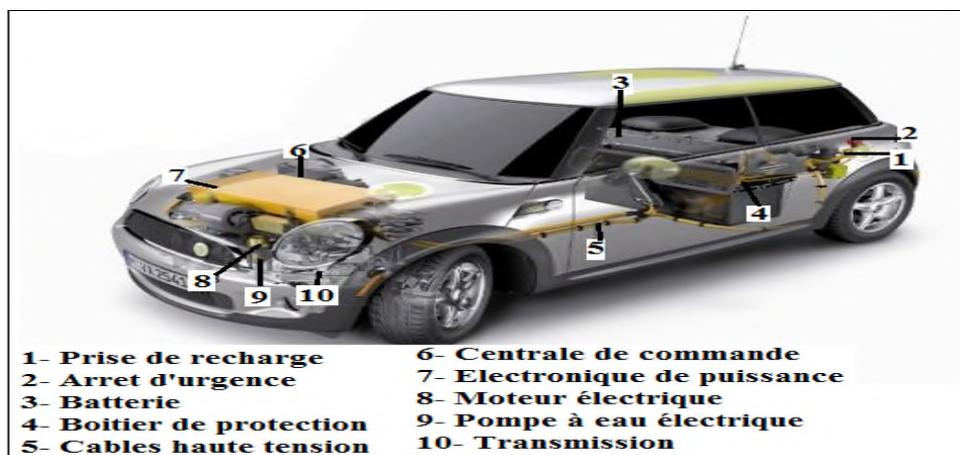


Figure I.5 : Voiture avec un moteur fixé au châssis [10].

Dans ce cas, la puissance est transmise sur les roues par des cardans. L'avantage de cette configuration est que la suspension isole les roues de la masse du moteur et la conduite du véhicule est plus facile [10].

I.5 Motorisation de la chaîne de traction

Les premiers moteurs électriques à être utilisés sur les véhicules électriques furent les moteurs à courant continu, car c'était le moteur le plus facile à piloter en vitesse. Grâce au développement de l'électronique de puissance, différentes gammes de moteurs électriques sont utilisées pour la propulsion des véhicules électriques [10].

I.5.1 Machines à courant continu (MCC)

Le moteur à courant continu à collecteur (MCC) et surtout à excitation indépendante confère, encore actuellement, la solution la plus économique grâce à son convertisseur d'induit de type hacheur à deux interrupteurs (l'inducteur est aussi alimenté par un hacheur de petite puissance). C'est la technologie retenue par de nombreux constructeurs automobiles pour la commercialisation des véhicules électriques de première génération. Mais le MCC possède un certain nombre d'inconvénients bien connus et il sera très probablement remplacé par des moteurs à commutation électronique dans les générations suivantes. Citons quelques-uns de ces inconvénients. L'usure des balais, voir du collecteur nécessite un entretien périodique et produit des poussières conductrices qui finissent par nuire à l'isolement du collecteur lui-même et de l'induit. La commutation mécanique nécessite des pôles de commutation et des enroulements de compensation qui accroissent le volume. L'induit tournant, source des pertes principales, ne permet pas un refroidissement efficace, à l'eau par exemple, ce qui limite les possibilités de hautes performances, La vitesse périphérique du collecteur et de l'induit est limitée à 50 voire 75 m/s ce qui ne permet pas d'atteindre les vitesses élevées nécessaires à une puissance massique convenable [9].

I.5.2 Moteur synchrone à rotor bobiné (MSRB)

Généralement alimenté par un onduleur en pont à six transistors. C'est le moteur dont les caractéristiques se rapprochent le plus de celles du MCC à excitation indépendante, il permet d'optimiser facilement le rendement (action sur le flux et le courant d'induit). Enfin, le fonctionnement à puissance maximale constante est aisé à obtenir sur une très large plage de vitesse. Son rotor bobiné est cependant source de pertes et sa vitesse maximale est limitée à 130 m/s environ [9].

I.5.3 Moteur synchrone à reluctance variable (MSRV)

Cette solution développée par FIAT. Il s'agit d'un moteur synchrone à bobinage triphasé réparti et alimenté par onduleur triphasé en pont classique. Pour obtenir des performances satisfaisantes aussi bien en terme de couple/pertes, de facteur de puissance que de plage de fonctionnement à puissance maximale constante, il est nécessaire d'avoir un grand rapport des inductances directes sur transverses. Un rapport supérieur ou égal à 10 (satisfaisant) est atteint grâce à la construction de rotors spéciaux dits "axialement laminés". De tels rotors sont constitués de paquets de tôles intercalés entre des couches amagnétiques et montés axialement de telle façon que le flux, dans l'axe direct, passe aisément d'un pôle à l'autre. Les performances de ces moteurs sont supérieures à celles des moteurs asynchrones, mais cette technologie de rotor reste aujourd'hui délicate à réaliser et il reste à trouver des solutions pour la fabrication en série [9].

I.5.4 Moteur asynchrone à cage d'écureuil (MASCE)

Son alimentation est effectuée par un onduleur triphasé, c'est une solution envisagée par de nombreux constructeurs, car ce moteur est bien connu et surtout on possède l'expérience de sa fabrication en série. Le contrôle vectoriel permet d'obtenir de bonnes performances et ceux pour des vitesses élevées jusqu'à l'arrêt, et associé à un contrôle approprié du flux, le rendement peut être optimisé. Son rendement est moins bon que celui des MSAP. Le "fonctionnement à puissance constante" est aussi possible, mais la plage de vitesse est limitée par le rapport du couple maximal (sommet de la caractéristique de couple à flux maximal) sur le couple "nominal". Cette contrainte conduit, quelques fois, à utiliser le moteur en couple nominal pour étendre sa plage de vitesse [9].

I.5.5 Machine asynchrones à double étoile (MASDE)

La machine asynchrone double étoile rentre dans la catégorie des machines multiphasées. Elle comporte dans le stator deux systèmes de bobinages triphasés décalés entre eux d'un angle électrique, et un rotor bobiné ou à cage d'écureuil similaire à celui d'une machine asynchrone classique. Les machines multiphasées sont plus avantageuses que les machines conventionnelles. Parmi ces avantages, on peut citer la segmentation de puissance, la fiabilité, la minimisation des ondulations du couple et des pertes rotoriques. Son alimentation est assurée par deux sources triphasées à fréquence et amplitude égales, déphasées entre elles d'un angle ($\alpha=30^\circ$) [3]-[11].

I.5.6 Machines asynchrones à double alimentation(MADA)

L'intérêt porté à la MADA ne cesse de croître surtout dans le domaine des énergies renouvelables. En effet, dans le domaine éolien, la MADA présente bien des avantages : le convertisseur lié à l'armature rotorique est dimensionné au tiers de la puissance nominale du rotor et les pertes dans les semi-conducteurs sont faibles. Pour des applications motrices, la machine asynchrone à cage occupe certes la première place, néanmoins la MADA alimentée par deux convertisseurs présente, notamment pour des applications de grandes puissances, de bonnes performances : fonctionnement en survitesse (jusqu'à deux fois la vitesse nominale) sans défluxage, bonnes performances à très basse vitesse pour un fonctionnement sans capteur de vitesse. Par ailleurs, la MADA grâce à sa double alimentation offre plusieurs possibilités de reconfiguration du mode de fonctionnement de la machine [12].

I.5.7 Moteur synchrone à aimants permanents (MSAP)

Il existe de nombreuses façons de disposer les aimants au rotor (en surface insérée ou non, pièces polaires, "enterrés" avec ou sans concentration de flux). Si l'objectif est d'obtenir un fonctionnement à puissance constante, il est nécessaire d'avoir une réaction d'induit importante (judicieusement optimisée) et il est nécessaire d'avoir des aimants "enterrés" ou insérés entre des pièces polaires. Le rendement de tels moteurs est excellent à condition de disposer d'aimants à hautes performances. La technologie Samarium Cobalt ne semble pas avoir un coût compatible avec l'industrie automobile et la technologie Fer-Néodyme-Bore doit encore faire quelques progrès en ce qui concerne la tenue en température et le prix. Ce dernier type d'aimants constitue un espoir important dans le domaine des moteurs électriques. Quant aux ferrites, dont le prix est acceptable en production de grande série, ils confèrent des performances relativement modestes aux MSAP, mais ne sont pas à exclure. Les MSAP sont souvent retenus pour les appareils de mesure de précision, robots industriels, machines-outils, l'entraînement de véhicules électriques et, particulièrement pour les entraînements directs de roue. Il est toujours alimenté à travers un onduleur triphasé [12]-[9].

I.6.1 Constitution de la machine synchrone à aimants permanents

La machine synchrone est constituée d'une partie fixe appelée stator et d'une partie mobile qui est le rotor [2].

a) Stator

Le stator est similaire à celui de la machine asynchrone. Il se compose d'un bobinage distribué triphasé, tel que les forces électromotrices générées par la rotation du champ

rotorique soient sinusoïdales ou trapézoïdales. Ce bobinage est représenté par les trois axes (a, b, c) déphasés, l'un par rapport à l'autre, de 120 degrés électriques (Figure I.6) [2].

b) Rotor

Le rotor se compose d'aimants permanents. Les aimants permanents présentent l'avantage d'éliminer les balais et les pertes rotoriques, ainsi que la nécessité d'une source pour fournir le courant d'excitation. Cependant, on ne peut pas contrôler l'amplitude du flux rotorique [2].

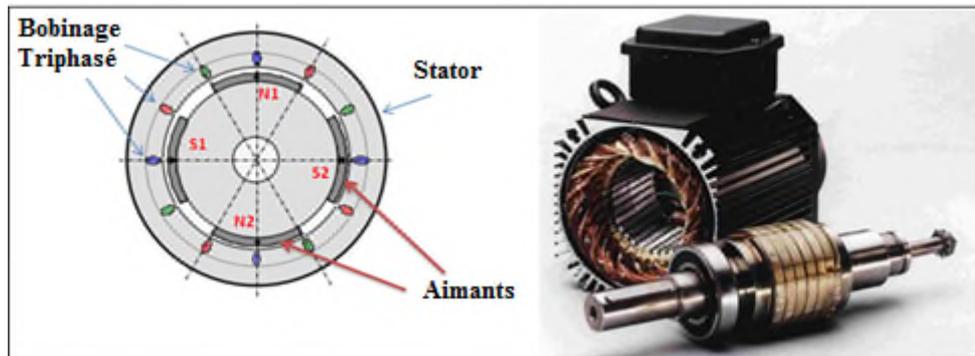


Figure I.6 : Machines synchrones à aimants permanent [2].

I.6.2 Aimants permanents

Les aimants permanents (APs) sont à base des matériaux ferromagnétiques durs. Ces matériaux forment un sous-groupe des matériaux ferromagnétiques. Ils possèdent une aimantation naturelle présente en absence de champ magnétique extérieur, ainsi qu'un champ coercitif et une rémanence élevés. Comme pour les autres matériaux ferromagnétiques, les ferromagnétiques durs ont la particularité de s'aimanter fortement en présence d'un champ magnétique extérieur. On distingue les ferromagnétiques durs des ferromagnétiques doux par leurs propriétés magnétiques, telles que la forme de leur cycle d'hystérésis. Le cycle d'hystérésis des ferromagnétiques doux est fin et allongé vers le haut, alors que celui des ferromagnétiques durs est aplati et allongé sur l'axe des abscisses.

Le choix des APs est essentiel puisqu'ils interviennent pour beaucoup dans le couple massique ou la puissance massique de la machine électrique. Les aimants sont principalement caractérisés par leurs cycles d'hystérésis et plus particulièrement par la courbe de désaimantation du deuxième quadrant du plan $B-H$. les figures I.7 et I.8 sont caractérisées par:

- l'induction rémanente B_r , c'est-à-dire l'induction résiduelle en circuit fermé ;
- le champ coercitif de l'induction H_{cj} qui est le champ démagnétisant annulant l'induction, plus sa valeur est élevée et plus l'aimant est stable ;

- le produit d'énergie volumique $(B.H)_{max}$;
- les valeurs H_m et B_m du point de fonctionnement optimal M correspondant à $(B.H)_{max}$.

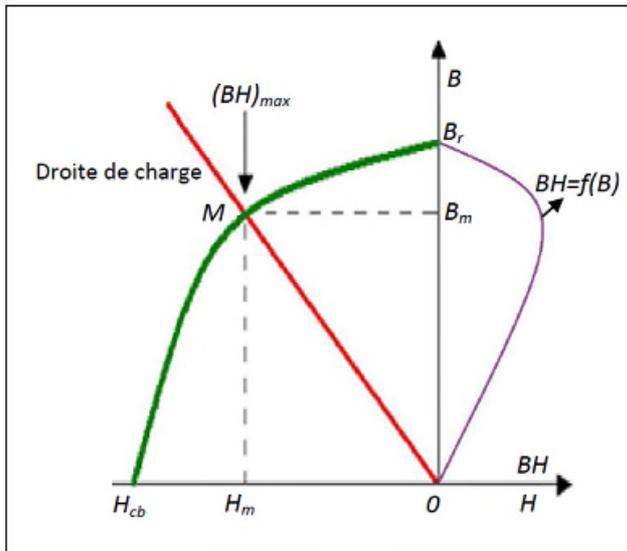


Figure 1.7 : Courbe de désaimantation.

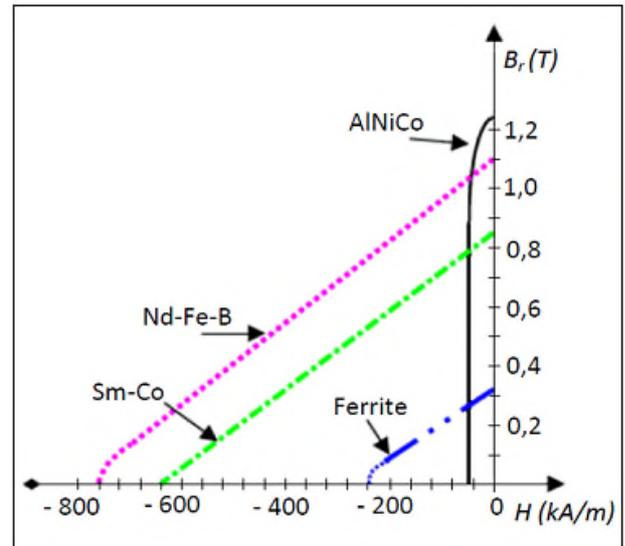


Figure 1.8: Courbes de désaimantation des principaux types d'aimants.

a- Les aimants AlNiCo

Sont des alliages à base de Fer, d'Aluminium et de Nickel, avec des additions Cobalt, Cuivre ou de Titane. Ils peuvent être isotropes ou anisotropes. Pour les isotropes $B_r \approx 0.7$ T (valeur élevée), H_{cj} de 50 à 80 A/m (valeurs faibles) et $(BH)_{max}$ de 12 à 18 kJ/m³. Le Titane augmente la trempabilité, le Niobium la coercivité. Sensibles aux champs antagonistes, leur part de marché est assez réduite et leur coût est moyen. La température de Curie pour ce type d'aimant est de 750 à 850° C.

b- Les aimants ferrites

Sont des composés d'oxyde de Fer, de Baryum et de Strontium. Ils sont par frittage et peuvent être isotropes ou anisotropes. Suivant la composition et la fabrication, on obtient les propriétés suivantes : B_r de 0.2 à 0.4 T (valeurs faibles), H_{cj} de 140 à 300 A/m (valeurs importantes), $(BH)_{max}$ de 10 à 40 kJ/m³. Ces aimants possèdent des performances modestes mais imposés dans de très nombreuses applications en raison de leur faible prix et de leur rigidité magnétique élevée permettant de les utiliser dans les machines. En raison de la valeur d'aimantation rémanente faible, il faut cependant recourir à des structures complexes de ces machines, à concentration de flux, pour atteindre des couples massiques et volumiques importants. La température de Curie pour ce type d'aimant est de 300° C.

I.6.3 Les aimants à terres rares

a- Les aimants Samarium-Cobalt

Sont beaucoup plus performants et autorisent une température de fonctionnement élevée (de -60°C à 250°C), mais ils sont très coûteux à cause de la présence du cobalt dans leur composition. Leur champ rémanent et leur excitation coercitive sont élevés.

b- Les aimants Néodyme-Fer-Bore (*Nd-Fe-B*)

Ont des performances supérieures aux Samarium Cobalt et sont beaucoup moins coûteux mais leur tenue à la température est moins bonne (jusqu'à 160°C). Leur champ rémanent et leur excitation coercitive sont élevés aussi. Leur inconvénient reste le coût important.

I.6.4 Différentes structures de la MSAP

Les structures de la machine synchrones à aimants permanents sont classées suivant la disposition des aimants sur le rotor. Leurs différentes configurations incluent les machines à flux radial (RFPM) et à flux axial (AFPM) (Figure I.8). Celles-ci peuvent être alimentées, soit par des courants sinusoïdaux ou par des courants en créneaux. Une vue schématique des deux types de machines à aimants, à flux radial et à flux axial.

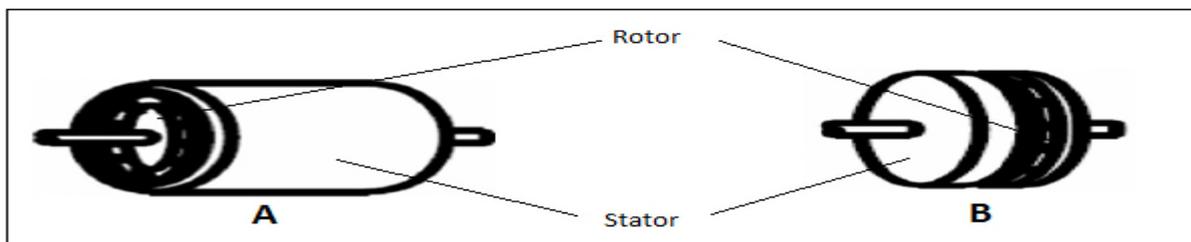


Figure I.9: (A) à flux radial, (B) à flux axial.

I.6.4.1 Structures à flux radial (RFPM)

La machine synchrone à flux radial (RFPM) est la machine à aimant la plus conventionnelle. Elle est employée couramment pour l'entraînement direct. Son stator est identique à celui d'une machine d'induction classique. Ces structures peuvent se présenter, soit avec un rotor placé à l'intérieur ou à l'extérieur (Figure I.10). Les différents types de rotor de machines à flux radial sont munis d'aimants montés soit en surface, soit encastrés soit chapeautés ou enterrés [3].

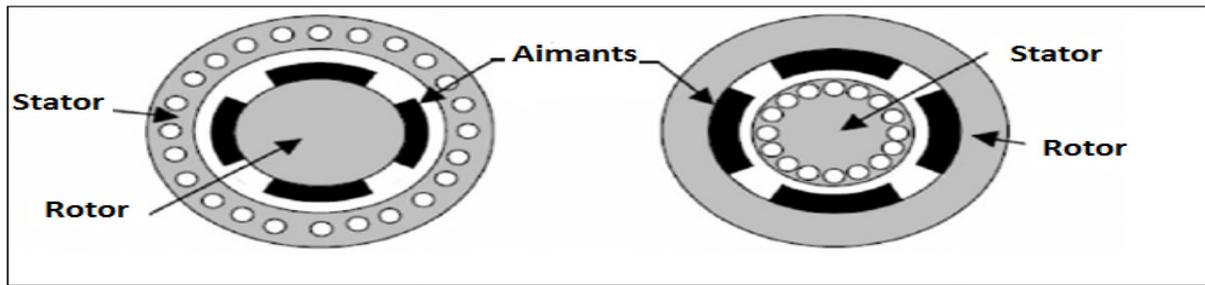


Figure I.10: Exemple de structures à rotor interne et à rotor externe.

a- Machines synchrones à aimants permanents montés en surface (MSAPS)

Cette structure est la plus simple à construire parce que des aimants permanents sont disposés directement sur la périphérie du rotor. Les aimants ont généralement une forme de tuile et sont collés sur une culasse cylindrique (Figure I.11). Cette structure de machine rentre dans la catégorie des machines à pôles lisses.

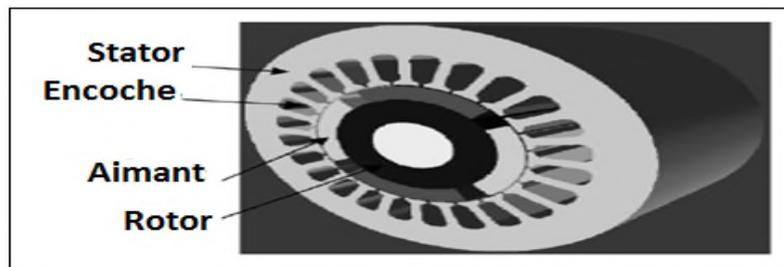


Figure I.11: Machine synchrone à aimants permanents montés en surface.

b- Machines synchrones à aimants permanents insérés (MSAPI)

A partir de la structure précédente, on entaille des logements pour insérer les aimants permanents dans le rotor afin de faciliter l'assemblage mécanique. Les parties de fer entre les aimants permanents sont des espaces inter polaires qui rajoutent de la saillance (Figure I.12). Toutefois, les caractéristiques de cette structure restent fondamentalement proches de la MSAPS.

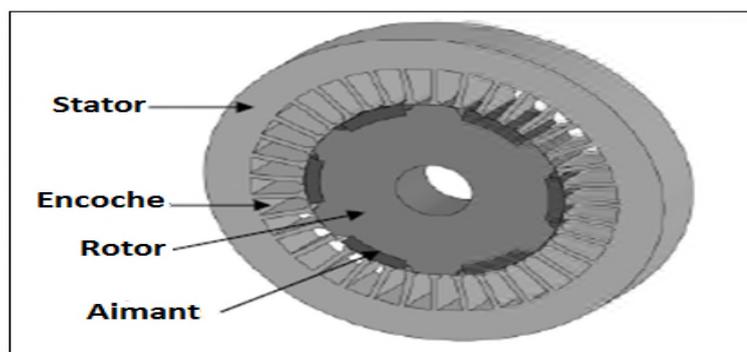


Figure I.12: Machine synchrone à aimants permanents insérés.

c- Machines synchrones à aimants permanents chapeautés (MSAPC)

Cette structure est déduite de celles avec des aimants permanents montés en surface. On place sur les aimants des pièces polaire généralement en acier doux. Les pièces polaires permettent de contrôler la forme de la f.e.m au stator en agissant sur le profil de la pièce (Figure I.13) [5].

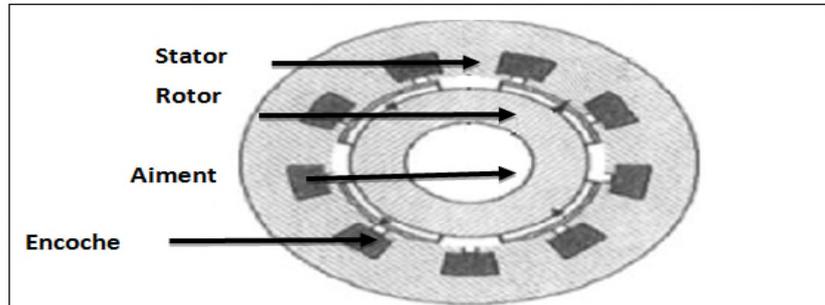


Figure I.13: Machine synchrone à aimants permanents chapeautés.

d- Machines synchrones à aimants permanents enterrés (MSAPE)

La structure des inducteurs de ce type de machine est à géométrie complexe. Les aimants sont enterrés à l'intérieur du rotor. La robustesse mécanique de ce type de rotor permet d'atteindre de très grandes vitesses pour des puissances importantes. Deux configurations du rotor peuvent être distinguées, l'une est à concentration de flux et l'autre à structure classique (Figure I.14).

L'avantage de ces deux configurations réside dans la possibilité de concentrer le flux produit par ces aimants, permettant ainsi d'assurer des niveaux d'inductions élevées dans l'entrefer. De plus, les aimants enterrés sont bien protégés contre la démagnétisation.

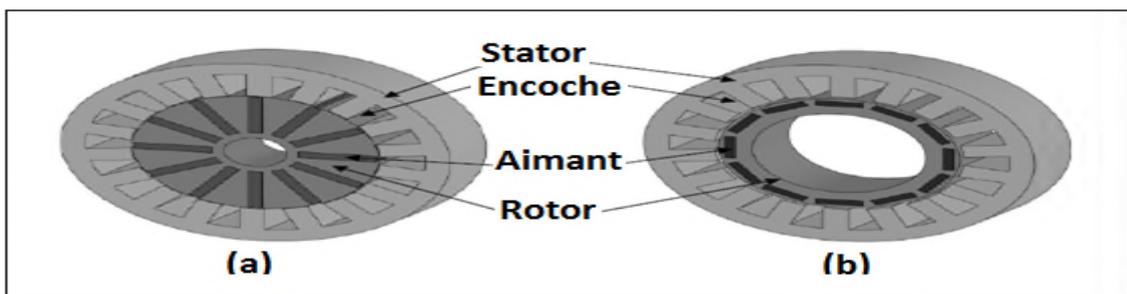


Figure I.14: (a) avec concentration de flux, (b) structure classique.

I.6.4.2- Structures à flux axial (AFPM)

Ces machines dites « discoïdales » ou AFPM représentent une autre solution possible pour les entraînements directs à basse vitesse. Elles comportent un ou plusieurs disques fixes bobinés et un ou plusieurs disques mobiles supportant les aimants permanents. Leur principal avantage est l'optimisation de la surface utile de génération du couple, qui se traduit par une

puissance volumique importante. Cependant, leur assemblage est très compliqué, à cause des contraintes mécaniques liées aux poussées axiales. Comparées à la structure à flux radial, ces machines se caractérisent par un plus grand diamètre et une longueur axiale relativement plus courte. Le flux provenant des aimants est axial tandis que le courant est dans la direction radiale. Différentes configurations à flux axial existent: celle à structure simple avec un seul rotor associé à un seul stator et celles à double entrefer avec soit, un seul stator inséré entre deux rotors ou un seul rotor inséré entre deux stators. L'exploitation de ces machines dans le domaine de traction (vélo électrique et voiture hybride) est très prometteuse [6].

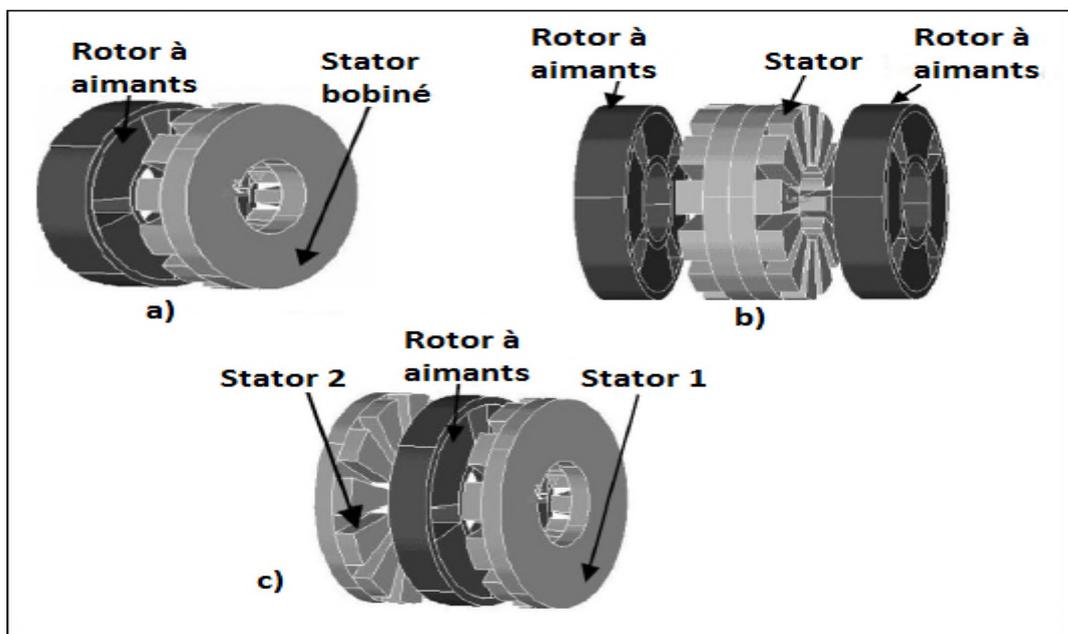


Figure I.15: a) Structure à flux axial simple avec un rotor et un stator, b) Structure à aimantation axiale avec double stator et un rotor, c) Structure à flux axial avec double rotor et un stator.

I.7 Moteur synchrone à aimants permanents double étoile (MSAPDE)

Le moteur synchrone à aimants permanents double étoile (MSAPDE) présente deux stator semblables au stator de la machines asynchrone à cage. Mais avec un changement des bobinages rotoriques par des aimants permanents qui apportent beaucoup de simplicité comme l'élimination des ballais (donc les pertes rotorique).

La machine synchrone est devenue attractive et concurrente à la machine à induction dans le domaine des systèmes d'entrainements électriques. Le grand avantage de cette dernière est l'élimination des pertes par glissement. En particulier, la machine à aimants

permanents est utilisée largement dans plusieurs applications. Comme les machines-outils, la robotique, les générateurs aérospatiaux et les véhicules électrique. Cette large utilisation est devenue possible avec les hautes performances des aimants permanents. Surtout avec le progrès technologique enregistré dans ce domaine qui a permis de concevoir des servomoteurs à aimants de plus en plus performants. Ces derniers sont actuellement les mieux placés pour répondre aux exigences de telles applications.

I.7. Avantages et inconvénients des MSAPDE

Lors de construction des machines synchrones à aimants permanents double étoiles l'utilisation des aimants permanents a la place des bobinages d'excitation offrent beaucoup d'avantage [13] :

- Suppression de l'alimentation du rotor (absence du contact bagues balais) ;
- Moins des pertes de cuivre, les pertes viennent surtout du stator ;
- Facteur de puissance et rendement du moteur est améliorées ;
- Une meilleure performance dynamique ;
- Construction et maintenance plus simple ;
- Pas d'échauffement au rotor, et absence des pertes joules.

Cependant, les machines à aimants permanents double étoiles ont des inconvénients [13] :

- Prix des aimants le rend plus cher ;
- La présence de pulsation de couple ;
- Risque de désaimantation, ce qui limite l'utilisation par les des contraintes. comme la température max, courant max....etc ;
- Pertes par courant de Foucault dans les aimants.

I.8 Choix des moteurs électriques

Le choix du moteur à installer sur un VE dépend de plusieurs paramètres. Sachant que chaque gamme de moteurs présente des avantages et des inconvénients liés aux coûts de production des moteurs ou de leurs achats par les constructeurs, coût qui se répercutera automatiquement sur le prix du véhicule. Ce choix dépend aussi fortement de l'application désirée et selon le cahier de charges défini. En général, c'est le couple qui définira le type de moteur. Dans la gamme des moteurs alternatifs, le choix est vaste avec les moteurs

asynchrones, les moteurs synchrones à rotor bobiné, à aimants permanents, réluctance variable ou à double étoiles [12].

Tableau I.1 : Comparaison pour le choix du moteur.

	MCC	MAS	MSRB	MSAP	MADA	MSAPDE	MASDE
Construction	Simple	Simple	Complexe	Assez Complexe	Assez complexe	Assez complexe	Assez complexe
Rendement	Moyen	Bon	Bon	Très bon	Bon	Très bon	Très bon
Vitesse maximal	Passable	Bonne	Bonne	Bonne	Bonne	Bonne	Passable
Fiabilité	Bonne	Excellente	Bonne	Bonne	Bonne	Excellente	Bonne
Cout du moteur	Passable	Bon	Moyen	Moyen	Très bien	Passable	Passable
Cout électronique de puissance	Très bon	Moyen	Moyen	Moyen	bon	Passable	moyen

I.9 Avantages et inconvénients de la voiture électrique

De nos jours la voiture électrique nous a permis d'avoir beaucoup d'avantages :

- Pas d'émission de CO₂, donc pas de pollution (zéro émission) ;
- Silencieuse ;
- La facilité de contrôle du véhicule grâce à l'absence d'embrayage et la boîte à vitesse ;
- Capacité de démarrer a des couples élevé contrairement au véhicule thermique ;
- Moins d'entretien, pas de vidange ni des filtres à changer ;
- Longévité supérieure des organes de traction ;
- Capacité de l'auto-alimentation des systèmes d'alimentation du véhicule grâce à la récupération de l'énergie cinétique [14].

Cependant nous rencontrerons quelques inconvénients :

- L'impact de ses batteries souvent en lithium ion, ce matériaux reste rare et très polluant pour l'extraire ;
- L'autonomie, le pleins d'un véhicule thermique peux allez jusqu'à 1100 km avec un temps de recharge de 5 min max (cela varie tout dépend de type de véhicule et sa

motorisation), contraient aux véhicules électrique qui est de 350 km voir plus pour quelques modèles tel que tesla S avec un temps de charge de 6 h à 8 h ;

- Elle coûte cher à l'achat ;
- L'incapacité de recharger a tous les points de station traditionnel car les bornes de recharge sont encore non populaires vue le non développement d'un marché réel concurrentiel aux VT, qui reste à nos jours timide qui se résume que sur quelques modèles ;
- La durée de vie des batteries qui est limité par le nombre de cycle de vie indiquer par le constructeur ;
- Des risques d'échauffement des batteries.

I.10 Système de propulsion

Technologiquement parlant, un moteur électrique peut atteindre les niveaux de puissance d'un moteur thermique. Il n'y a pas de réelle limite à la puissance d'un moteur électrique si ce n'est sa taille. En effet, comme c'est largement le cas pour un moteur thermique, plus le moteur est puissant plus il est volumineux. Sur ce terrain, le moteur électrique est d'ailleurs mieux équipé, puisque qu'à taille comparable il est souvent plus puissant. Par ailleurs, la puissance du moteur électrique est plus linéaire car il produit plus de couple dès le démarrage [16].

En ce qui concerne la vitesse, pas d'inquiétude à avoir non plus. Puisque le moteur électrique peut fournir beaucoup de puissance, rien ne s'oppose à ce qu'une voiture électrique puisse aller vite, et même très vite.

Pour les applications automotrices, la performance idéale du système de propulsion est d'avoir une puissance constante sur toute la plage de vitesse. De ce fait, le couple change de façon hyperbolique avec la vitesse. À une vitesse faible, le couple est contraint à être constant afin de ne pas surpasser le couple maximal qui garantit l'adhésion entre les roues et le sol. Le moteur électrique avec contrôleur s'approche plus de ces caractéristiques que le moteur à combustion, qui aura besoin d'engrenages multiples pour pouvoir suivre la courbe idéale.

Il y a notamment le problème des batteries. En effet, plus le moteur est puissant ou plus la vitesse de déplacement est élevée, plus la consommation électrique est forte. Hors la quantité d'énergie embarquée par les batteries actuelles est encore trop faible pour permettre

de maintenir une vitesse importante sur de longue distance. Ainsi, la plupart des voitures électriques voient leur vitesse de pointe bridée pour préserver l'autonomie, faute de quoi il faudrait embarquer des tonnes de batteries dans chaque voiture.

I.11 Source d'énergie

Hier au nickel et cadmium ou au plomb, aujourd'hui avec du lithium, demain en employant peut-être du graphène, les batteries de traction des voitures électriques évoluent pour toujours plus de légèreté, d'autonomie et de propreté.

I.11.1 Batteries au plomb-acide

Les batteries au plomb sont utilisées dans l'automobile depuis plus de 150 ans, les premiers essais de traction électrique sur des véhicules ont été effectués quelques années plus tôt, avec des accumulateurs qui ne se rechargeaient pas : de grosses piles, en quelque sorte [9].

I.11.2 Batteries Nickel-Cadmium

Fiables si bien utilisés et entretenus, acceptant la recharge rapide, ils disposent d'une longue durée de vie qui se calcule en dizaines d'années. C'est simple, ils ne s'usent qu'à l'usage, contrairement aux batteries lithium. Déchargées, ils peuvent être stockés de très longues années sans aucun dommage [17].

I.11.3 Batteries Sodium-chlorure de nickel (Zebra)

Présentes au cœur de quelques modèles de voitures électriques développés par des constructeurs de taille modeste, les batteries Zebra (Zeolite battery research africa project) ont été utilisées à partir de la fin des années 1990 jusqu'à tout récemment, en alternative à la technologie NiCd. Il s'agissait de bénéficier d'une meilleure autonomie.

Les batteries Zebra ne représentent pas un problème environnemental particulier à condition d'obtenir le nickel, l'aluminium et le sodium dans des conditions acceptables d'extraction. En revanche, elles doivent être réservées à une exploitation dans des flottes en quasi permanente rotation, du fait que leur température interne doit toujours être maintenue entre 270 et 350° C, d'où un phénomène très important d'autodécharge-autoconsommation (plus de 10% de perte par jour) [18].

I.11.4 Batteries Lithium-métal polymère (LMP)

Les batteries LMP sont une des déclinaisons technologiques actuelles qui emploient le Lithium au service de l'électromobilité sans effet mémoire, donc compatible avec la pratique du biberonnage, une durée de vie supérieure à celle des accumulateurs lithium-ion plus répandus, et une plus grande sécurité d'utilisation (pas de risque d'emballement thermique) devaient justifier l'emploi et le développement des LMP [18].

I.11.5 Batteries Lithium-ion

Ces batteries font partie des nouveaux types fort prometteurs. Leurs énergies massique et volumique sont très élevées, de l'ordre de respectivement 150 Wh/kg et 300 W/kg. Le lithium est en effet le plus léger des métaux et possède un potentiel électrochimique élevé, ce qui en fait le métal le plus attractif pour constituer l'électrode négative d'une batterie [19].

I.11.6 Batteries Nickel-métal hydrure

Un accumulateur NIMH est composé d'une électrode positive à base d'hydroxyde de nickel et d'une électrode négative constituée d'un composé intermétallique hydratable. Ces deux électrodes sont isolées électriquement l'une de l'autre par un séparateur afin d'éviter la mise en court-circuit du système. L'électrolyte utilisé est de la potasse concentrée [19].

I.12 Critères de sélection

Dans une application de traction, le poids à embarquer est une contrainte majeure. Ceci étant un choix rigoureux de la source s'impose. Avant de faire ce choix, nous avons procédé à une étude comparative des différents modèles susnommés en prenant en considération plusieurs critères de performances :

- Énergie spécifique (W.h/kg) ;
- Puissance spécifique (W/kg) ;
- Rendement charge-décharge ;
- Durée de vie ;
- Coût spécifique.

Tableau I.2 : Comparaison pour le choix de la batterie

Types de batteries	Energie en Wh/kg	Nombre de cycles	% (1)	Volts	Avantages	Inconvénients
Plomb	30-50	400-1200	5/m	2.1	Faible cout	Faible coût
NiCd	45-65	1000-2000	20/m	2.3	Performance à froid	Toxicité peut de puissance
NiMH	55-80	500-1500	30/m	1.3	Energie correcte	Coûteux
Zebra	80-120	800-1200	12/j	2.6	Bonne énergie	Température élevée
NiFe	20-60	800-1000	40/m	1.2	Résistance décharge et surcharge	Risque d'explosion
Li-ion	120-200	500-1000	10/m	3.6	Pas d'effet mémoire	Coûteux
LiFe-Po	130-200	500-800	10/m	3.6	Faible poids	Peu de cycle
LMP	120-180	200-600	10/m	3.6	Longue durée de vie	Cout, peu de cycles, température
LiTi	50-80	>6000	10/m	2.4	Charge très rapide	Faible énergie
Li-air	1700-2400	10-100	10/m	3.6	Moins polluante, gain de place	Utilisation air pur et optimale à 30-105°C
Li-Po	150-190	200-300	10/m	3.7	Faible poids, formes variées	Coûteux et peu de cycles

I.13 Super condensateur

Il est intéressant d'associer l'avantage des super-condensateurs qui permettent de fournir de fortes puissances. Contrairement à la batterie, le SC est principalement une source de puissance avec une basse capacité d'énergie. L'énergie maximale stockée dans le SC est donnée par :

$$E_{max} = \left(\frac{1}{2} C_{\text{élé}} V_{c_ser}^2\right) \quad (I.1)$$

Donc il faut trouver un compromis entre le volume, le poids et un prix acceptable. Mais, il faut aussi gérer la charge et la décharge des deux sources d'énergie. Donc, des convertisseurs spécifiques doivent limiter le courant sortant et entrant des batteries et des super-condensateurs. Ces convertisseurs doivent aussi surveiller et limiter la tension maximale de chaque élément de la batterie et des supercondensateurs grâce au circuit B.M.S (battery management system). Une solution est que la batterie et les supercondensateurs fournissent l'énergie à un bus continu DC par l'intermédiaire de deux hacheurs réversibles en courant (hacheur 1 et hacheur 2). Ce bus continu permet d'alimenter le variateur du moteur du véhicule [16].

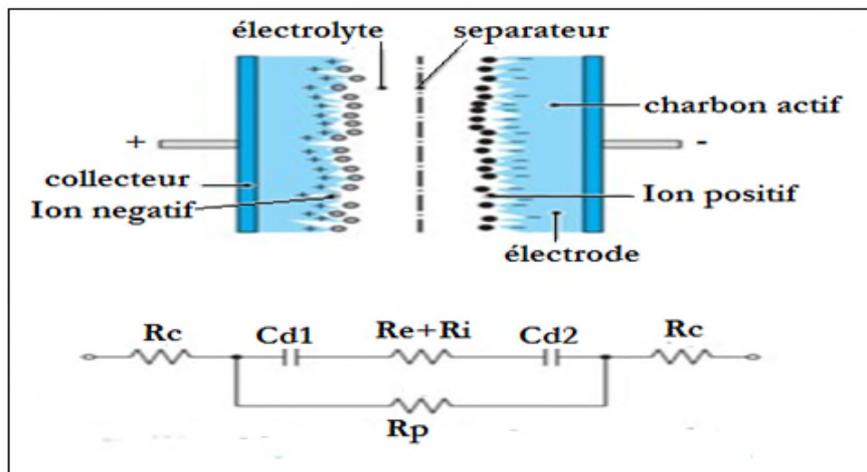


Figure I.16: schéma de principe du Fonctionnement d'un super condensateur [20].

Le principe de fonctionnement d'un super condensateur est basé sur le stockage de l'énergie qui est sous forme électrostatique, par distribution des ions provenant de l'électrolyte au voisinage de la surface des deux électrodes. En effet, lorsque l'on applique une tension aux bornes d'un super condensateur, on crée une zone de charge d'espace aux deux interfaces électrode-électrolyte. C'est cette zone de charge d'espace qui est appelée double couche électrique. On peut donc considérer la structure élémentaire d'un super

condensateur comme deux condensateurs en série séparés par une résistance équivalente. Le stockage de l'énergie est principalement électrostatique, le stockage de l'électricité s'effectuant par un simple déplacement de charges électroniques et ioniques. Il est estimé que le taux de réactions faradiques à la surface du carbone est compris entre 1 et 5%. Un super condensateur à une structure anode-cathode à base de charbon actif, permettant de disposer d'une surface active considérablement élevée par rapport aux condensateurs traditionnels. Cette surface associée à la faible épaisseur de la double couche permet d'obtenir des valeurs très élevées de capacités (1 à 5000F). L'utilisation de structures série parallèle de plusieurs cellules de super condensateurs permet d'atteindre une tension et un courant de sortie élevés [20].

I.13.1 Avantages et inconvénients du supecondensateur

Les supercondensateur sont beaucoup utilisées dans l'automobil électriques à cause de leur avantages qui sont [21]. :

- Le fait de disposer d'une puissance (en watts), immédiate ;
- Contrairement à la batterie, il supporte sans problème les cycles de charge-décharge ;
- Il est moins lourd qu'une batterie et, à la différence de celle-ci, il est insensible aux variations de température

Quoi que leurs inconvénients [21] :

- Sa capacité de stockage d'énergie nominale est pour le moment inférieure à celle de la batterie (en moyenne 5 wattheure/kg pour 150 watts heure/kg) ;
- Il peut présenter des risques électriques pour les intervenants (conducteur et passagers, maintenance, services de secours). En effet, sa particularité étant de restituer rapidement l'énergie accumulée sous forme de décharge, les intensités délivrées sont dangereuses en cas de contact (1 500 à 9 000 ampères en pointe)

I.13.2 Applications du supercondensateur dans l'automobile

Les supercondensateurs dans l'automobile est un moyen très efficaces, est d'une aide précieuse [22] :

- Assistance au démarrage ;

➤ Récupération d'énergie

I.14 freinage récupératif

Consiste à utiliser une partie de l'énergie de décélération du véhicule (énergie cinétique et énergie potentielle) pour recharger la batterie. En effet, un bilan des forces appliquées sur le véhicule fournit l'équation ci-dessous [23]:

$$M_{veh} \cdot \frac{dv_{veh}}{dt} = F_{trac} - F_{frein} - F_{resist} \quad (I.2)$$

Ou :

M_{veh} : Masse du véhicule ;

v_{veh} : vitesse du véhicule ;

F_{trac} : Force de traction fournie par les sources d'énergie ;

F_{frein} : La force provenant du freinage ;

F_{resist} : Forces de résistance.

I.15 Conclusion

L'impact sur l'environnement de la voiture électrique est lié principalement à la production de l'électricité, mais aussi aux émissions de particules fines, ce qui amène les auteurs de l'étude à conclure qu'elle est plus écologique que les voitures à moteur thermique.

L'objectif de ce chapitre était de réaliser une présentation succincte de la voiture électrique. Après avoir présenté un bref historique et un aperçu du VE, et leurs différentes architectures, nous avons aussi cité les différentes machines électriques pouvant être utilisées dans la traction du véhicule. Aussi, nous avons présenté les différentes sources d'énergies telles que les modèles des batteries utilisées et les supercondensateurs.

On a également énuméré toute une gamme de motorisation présentant des avantages et inconvénients divers. Ceci afin d'élargir le degré de liberté sur le choix du moteur à utiliser.

Dans le deuxième chapitre, nous allons modéliser les éléments constitutifs de notre chaîne de traction qui se compose de la machine électrique, les convertisseurs d'électronique

de puissance et les sources d'énergie (batteries, SC). Ce chapitre fera aussi une étude sur la dynamique du véhicule en passant par la chaîne de transmission mécanique.

CHAPITRE II

II.1 Introduction

Ce chapitre vise à donner une description plus ou moins détaillée des éléments constitutifs de la chaîne de traction globale hormis la commande qui sera étudiée dans le chapitre III et le système de gestion des flux d'énergie (Battery Management System) BMS.

La connaissance de la caractéristique mécanique de la charge entraînée est une étape essentielle dans le dimensionnement et le choix de la motorisation.

Dans ce chapitre, nous ferons une mise en situation de quelques cas essentiels afin de déterminer les exigences fonctionnelles du véhicule en matière de puissance. Nous savons déjà que la notion de puissance recouvre le couple et la vitesse et de ce fait une connaissance précise de ces grandeurs est nécessaire.

En effet, le véhicule doit être démarré, entraîné et stoppé suivant un profil de vitesse bien défini. [23].

Une fois le profil de la puissance déterminée vient le choix des convertisseurs DC/AC. Le choix de ces derniers se fera en fonction de la puissance la plus élevée autrement le pic de puissance le plus culminant. Nous aborderons ensuite l'indispensabilité des convertisseurs DC/DC et la nécessité de la mise en place d'un dispositif (commande) permettant de stabiliser la tension de sortie de ceux-ci.

II.2 Topologie de la chaîne de traction

Selon l'application et le cahier des charges, il existe une multitude de topologies de la chaîne cinématique possible pour les véhicules électriques. Dans notre cas, la topologie qui convient au mieux à l'application est donnée par la figure.II.1.

La batterie chimique est la source principale d'alimentation, elle occupe la majeure partie de l'énergie totale embarquée et intervient d'une manière permanente. Cependant elle dispose d'une densité de puissance modérée par rapport à la source secondaire [24].

Le SC est la source secondaire d'alimentation. Contrairement à la source principale, elle occupe une faible énergie embarquée avec une grande densité de puissance, elle n'intervient que dans les cas de fonctionnement particulier (accélération, décélération, reprise, montée d'une pente).

Grace à leur réactivité et leurs bonnes dynamiques les SC semblent être la solution idéale pour ces genres d'applications [25].

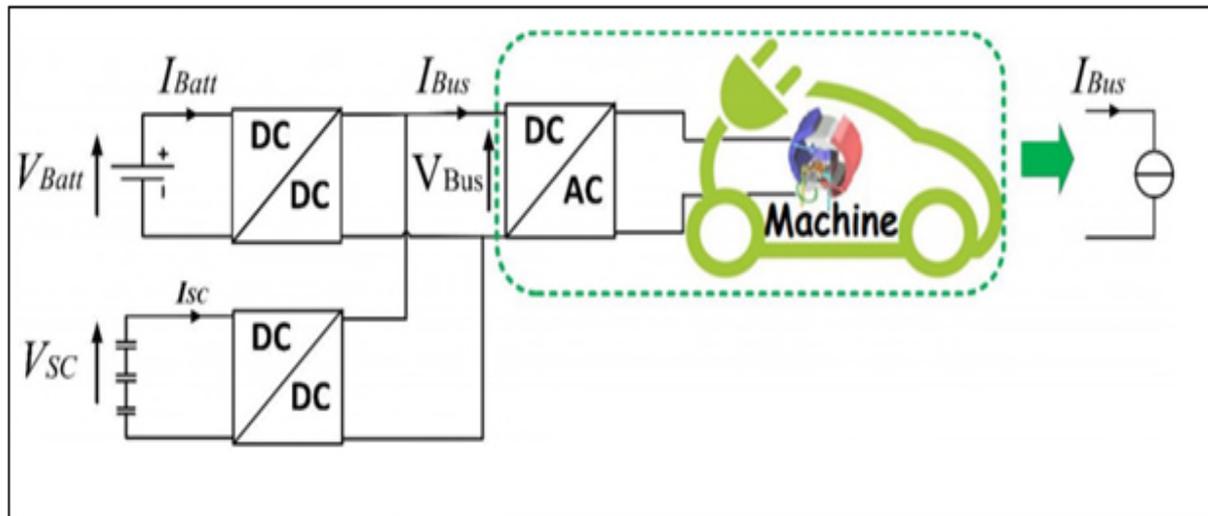


Figure II.1 : Topologie de la chaîne de traction [25].

Dans le cas où les sources sont chargées à leurs capacités maximales, le hacheur de freinage muni d'une résistance variable servira à dissiper le surplus d'énergie issue du freinage. Ce dispositif permet alors d'éviter la surcharge des batteries et augmenter ainsi leur durée de vie.

L'onduleur a pour rôle de transformer le courant continu en courant alternatif indispensable au fonctionnement de la machine.

Enfin, nous avons le convertisseur électromécanique qui permet la conversion d'énergie électrique en énergie mécanique et vice versa.

II.3 Technologie du pneumatique

Excepté les forces aérodynamiques dont l'effet s'exerce à travers la surface de la carrosserie, toutes les forces de contrôle ou de perturbations agissant sur le véhicule passent par les contacts roue-sol. Figure II.2 La roue doit : [26].

- Supporter la charge verticale tout en assurant un premier amortissement des oscillations venant de la route
- Développer des forces longitudinales permettant d'accélérer et de freiner le véhicule ;
- Développer des forces latérales permettant de prendre des virages et contrer des perturbations extérieures

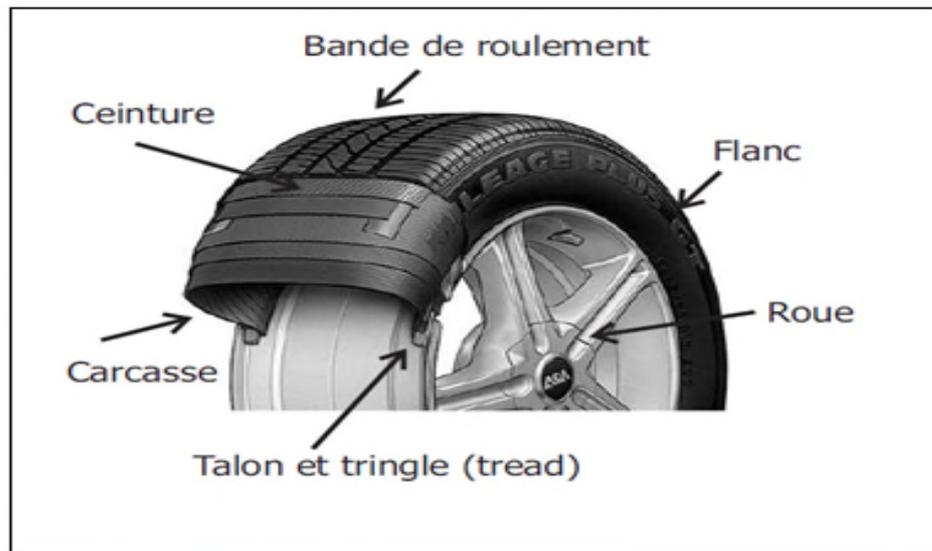


Figure II.2 : Construction du pneumatique.

II.4 Dynamique du véhicule et transmission de puissance

Comme tout solide en mouvement le déplacement du véhicule est entièrement régi par des lois dynamiques.

Les performances critiques pour le dimensionnement de la chaîne de traction du véhicule sont : la vitesse maximale, la pente maximale, ainsi que l'accélération maximale. De plus, dans le domaine du véhicule électrique, l'autonomie doit être considérée comme un autre indicateur essentiel, déterminant pour les performances. Toutefois, on peut remarquer que dans les conditions normales de fonctionnement ces performances maximales sont rarement utilisées. En effet, la plupart du temps la chaîne de traction travaille à charge partielle. La vitesse et l'effort varient donc beaucoup selon les conditions d'utilisation telles que l'accélération, le profil de la route, etc. De plus, les performances sont associées aux conditions du trafic (urbain, autoroutier,...) et au type de véhicule (familiale, sportive,...) et diffèrent beaucoup d'un cas à l'autre. Cela rend difficile la construction de cycles de fonctionnement universels décrivant avec précision les variations de vitesse dans tous les environnements du trafic actuel.

Comme exemple, le fonctionnement du moteur électrique de traction étant variable sur une large plage de vitesse et du couple, le rendement du moteur n'a pas la même valeur pour chaque point couple-vitesse, mais plutôt il est variable en fonction de ceux-ci [1]-[24].

II.4.1 Dynamique du véhicule

La deuxième partie du modèle dynamique, décrivant la dynamique du véhicule, reçoit les performances imposées au véhicule par le cycle et le profil d'élévation et fournit la puissance à la roue P_v qui peut s'exprimer par :

$$P_v = C_T \cdot \Omega_{roue} \quad (\text{II.1})$$

Le couple de traction total C_T et la vitesse de rotation de la roue Ω_{roue} sont calculés directement à partir de la force de traction du véhicule F_T et de sa vitesse imposée v :

$$\begin{cases} C_T = F_T \cdot r \\ \Omega_{roue} = \frac{v}{r} \end{cases} \quad (\text{II.2})$$

Où r est le rayon de la roue.

L'énergie nécessaire au déplacement du véhicule E_v est calculée selon l'expression suivant :

$$E_v = \int_0^t P_v \cdot dt \quad (\text{II.3})$$

D'après la deuxième loi de Newton, l'accélération du véhicule peut être décrite par

$$\alpha = \frac{dv}{dt} = \frac{F_T - F_R}{\delta M} \quad (\text{II.4})$$

Où, F_R est la force totale de résistance à l'avancement du véhicule, M la masse totale du véhicule. Est δ un coefficient intervenant sur la masse qui prend en compte l'effet des masses en rotation dans la chaîne de traction

De par l'orientation du modèle de conception, l'accélération α est une donnée du problème et peut être utilisée pour calculer la force totale de traction du véhicule F_T . La relation (II.1) devient :

$$F_T = F_R + \delta M \cdot a = F_R + F_{acc} \quad (\text{II.5})$$

Comme présenté dans la Figure.II.3, la force de résistance totale à l'avancement du véhicule F_R représente la somme de 3 forces résistantes, c'est-à-dire : la force de roulement F_{roul} , la force due à la pente F_{prof} et la force de résistance aérodynamique F_{aero} . Pour obtenir la force de traction F_T , il faut ajouter à la force de résistance la force d'accélération F_{acc} apparue dans (II.5). Cette force d'accélération peut être vue comme la

force nécessaire pour vaincre l'inertie du véhicule et donc permettre l'accélération du véhicule. Ainsi, l'effort total nécessaire F_T pour vaincre la résistance à l'avancement et accélérer le véhicule est de la forme :

$$F_T = F_{roul} + F_{prof} + F_{aero} + F_{acc} \quad (II.6)$$

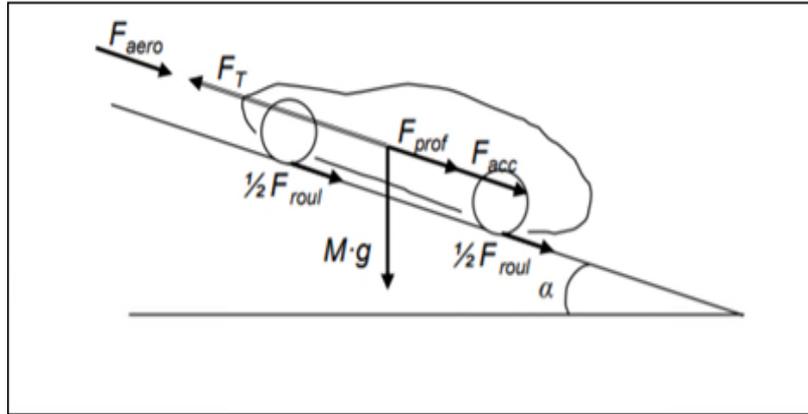


Figure II.3 : Ensembles des forces agissent sur le véhicule.

II.4.2 Force de roulement

La force de résistance au roulement F_{roul} est liée à la masse du véhicule M (kg), à l'accélération gravitationnelle g (9,81 m/s²) et à un coefficient de résistance au roulement C_r :

$$F_{roul} = \text{sign}[v] \cdot M \cdot g \cdot C_r \quad (II.7)$$

La force de roulement apparaît sur tout objet roulant. Dans le cas du véhicule, elle est due à la déformation de la roue ou du pneu et à l'état de surface de la route. C'est une force qui s'oppose toujours au déplacement. Dans un pneu en repos, la force normale à la route équilibre le poids du véhicule au niveau du contact roue/sol. Quand le véhicule roule, les deux forces ne sont plus alignées à cause de la déformation du pneu. La Figure.II.4 montre le décalage créé par la force de roulement qui produit un couple résistant à la roue [26].

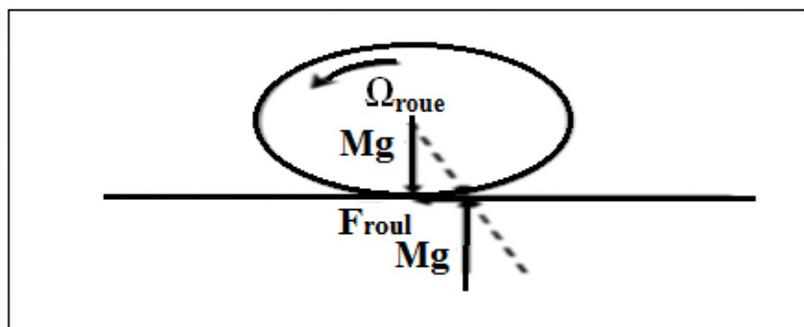


Figure II.4 : Les forces du roulement sur la roue.

Les facteurs qui affectent la résistance au roulement sont : le type de pneu, la pression des pneus, la température des pneus, la vitesse du véhicule, le revêtement routier, la matière du pneu et le niveau de couple transmis. Parmi ces facteurs, le type de pneu et la pression des pneus sont souvent les plus significatifs. Comme le C_r est proportionnel à la superficie de contact pneu/sol, un pneu plus petit minimise sa valeur, mais en même temps diminue l'adhérence de la roue. Le coefficient C_r pour les pneus radiaux montés habituellement sur nos voitures, est d'environ 0,013. Ce coefficient augmente lorsque la pression diminue. Pour la traction électrique Michelin a développé des pneus dits "verts" d'une valeur de seulement 0,007, soit environ la moitié d'un pneu classique. La résistance au roulement peut être minimisée en maintenant les pneus bien gonflés afin de réduire sa déformation.

II.4.3 Force due au profil de la route

La force liée au profil de la route F_{prof} est la force nécessaire à un véhicule de masse M pour vaincre une pente P_{pn} . Pour caractériser le profil de la route sur un parcours donné, il faut cartographier la pente en fonction de la distance parcourue. Ensuite, grâce à la vitesse, la distance est déterminée ce qui permet de déduire la valeur de la pente à chaque instant Figure II.5 [27].

$$F_{prof} = M \cdot g \cdot \sin \alpha \quad (\text{II.8})$$

Ou, α représente l'angle de la pente. Pour simplifier les calculs, $\sin(\alpha)$ est souvent remplacé par la pente, pour de faibles valeurs [27].

$$F_{prof} = M \cdot g \cdot P_{pn} \quad \text{pour } p \leq 20\% \quad (\text{II.9})$$

La pente en % est définie comme l'élévation verticale en mètres pour une distance horizontale de 100 mètres. Si y représente l'élévation verticale, la pente p (%) est donnée par la relation suivante [27]:

$$p (\%) = \frac{y(m)}{100(m)} \cdot 100(\%) = y$$

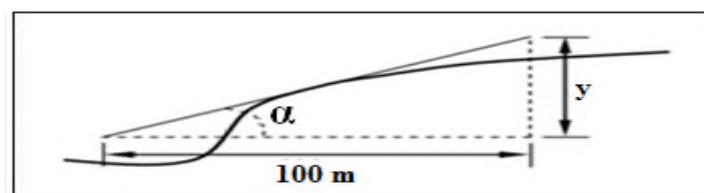


Figure II.5 : La pente sur la route.

Mais, la pente utilisée dans la figure II.5 pour calculer la force due au profil ne sera pas considérée en %. Elle est définie par la tangente de l'angle α :

$$p = \tan \alpha = \frac{y(m)}{100(m)} \simeq \sin \alpha \quad (\text{II.10})$$

La force due au profil routier peut s'écrire :

$$F_{prof} = M \cdot g \cdot \sin(\arctan p) \quad (\text{II.11})$$

II.4.4 Force de résistance aérodynamique

La force de résistance aérodynamique F_{aero} est proportionnelle à la densité volumique de l'air ρ , à la section frontale du véhicule S_f (m^2), au coefficient de pénétration dans l'air C_x (drag coefficient - C_d dans la littérature anglo-saxonne) Figure II.6, à la vitesse du véhicule v (m/s) et à la vitesse du vent v_v (m/s) qui est positive dans le sens inverse de v et négative dans le sens de v

$$F_{aero} = \text{sign}[v] \cdot (0.5 \cdot \rho \cdot C_x \cdot S_f \cdot (v - v_v)^2) \quad (\text{II.12})$$

En général ρ est pris égal à $1,23 \text{ kg/m}^3$ bien qu'il dépende de l'altitude et de la température. D'autre part, le coefficient de pénétration dans l'air C_x change de manière significative, s'étendant de 0,2 à 1,5 suivant le type de véhicule [28].

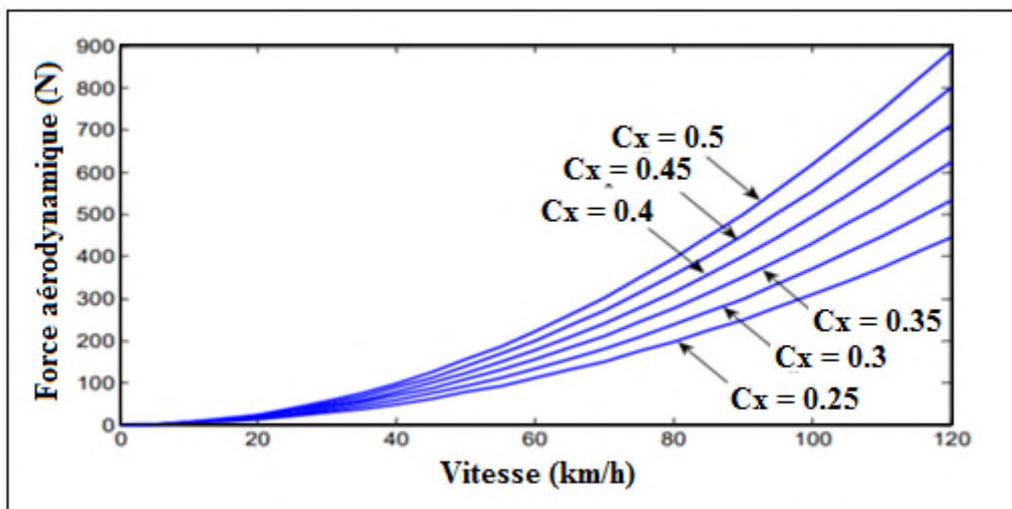


Figure II.6 : Force aérodynamique en fonction de la vitesse pour différentes valeurs du C_x [28].

Pour les véhicules particuliers la section frontale S_f peut être approximée à partir de la largeur et de la hauteur du véhicule ou à partir de sa masse. En effet, la section frontale varie

entre 79-84% par rapport à la surface donnée par le produit entre la largeur et la hauteur du véhicule. Par contre, basé sur les données des véhicules particuliers avec une masse entre 800 et 2000kg, la relation entre la section frontale S_f et la masse M peut être approximée par:

$$S_f = 1.6 + 0.00056 \cdot (M - 765) \quad (\text{II.13})$$

Environ 60% de la puissance nécessaire pour rouler sur l'autoroute est utilisée pour surmonter la résistance aérodynamique qui augmente très rapidement avec la vitesse. Par conséquent, un véhicule avec une aérodynamique sensiblement meilleure sera plus économe en consommation [29].

II.4.5 Force due à l'accélération

La force due à l'accélération assure le comportement dynamique souhaité par le conducteur. Cette force est obtenue par le produit entre la masse M de la voiture, l'accélération a imposée par le conducteur et un coefficient δ

δ est un coefficient sans dimension, légèrement supérieur à 1, qui augmente la masse du véhicule proprement dite afin de prendre en compte l'inertie des masses en rotation telles que les roues, les engrenages, les axes et les rotors des moteurs électriques. La variation de ce coefficient est de 1,01 à 1,4 d'après et de 1,08 à 1,1 d'après. Pour les véhicules particuliers le coefficient δ peut être calculé en utilisant une relation empirique [30] :

$$\delta = 1.04 + 0.0025 \cdot gr^2 \quad (\text{II.14})$$

Le terme 1,04 dans l'équation (II.14) représente la contribution de l'inertie en rotation des roues du véhicule. Le deuxième terme représente la contribution des autres composants qui tournent à la vitesse du moteur, ou gr est le rapport de réduction global rapporté aux roues.

Lors d'une phase d'accélération le coefficient a est positif et négatif lors d'une décélération. Comme les forces d'inertie (accélération et gravitation) sont réversibles, l'énergie liée à la force due à la pente F_{prof} et la force d'accélération F_{acc} peut être récupérée si la motorisation et les sources sont réversibles Figure II.7 [30].

Transmission mécanique de la chaîne de traction tout électrique :

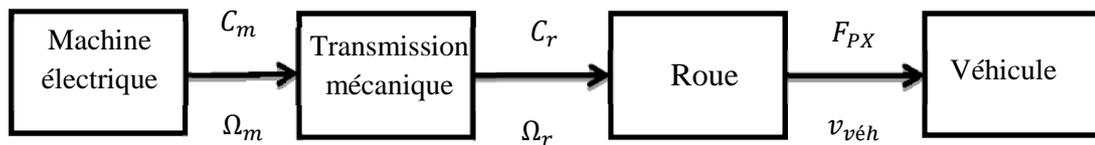


Figure II.7 : Schéma de la chaîne de traction. [30]

L'objet de la transmission de puissance mécanique est de relier la source d'énergie, le(s) moteur(s) électrique(s), aux roues motrices du véhicule, il s'agit d'adapter la vitesse Ω_m et le couple C_m du moteur aux exigences fonctionnelles du véhicule, c'est à dire le couple résistant à la roue C_r , lié à l'effort résistant F_{rm} par la relation :

$$C_r = F_{rm} R_r = \left[f_r m_{veh} g \cos(\alpha) + m_{veh} g \sin(\alpha) + \frac{1}{2} \rho S_f C_x v^2 + m_{eff} \cdot \gamma \right] \cdot R_r \quad (\text{II.15})$$

Où R_r est le rayon de la roue et Ω (rad/s) la vitesse angulaire liée à la vitesse du véhicule v_{veh} (m/s) par la relation :

$$\Omega_r = \frac{v_{veh}}{R_r} \quad (\text{II.16})$$

Le choix du moteur électrique et de sa puissance est déterminé au départ par deux conditions principales [35] :

- la première condition est d'assurer le démarrage en cote du véhicule. Pour une pente maximale donnée $\alpha = \alpha_{max}$ que peut rencontrer le véhicule, le couple du moteur électrique c_m ramené aux roues ($\eta_{red} \cdot i \cdot c_r$) doit être au moins égal au couple résistant C_r pour $v_{veh} = 0, \gamma = 0, \alpha = \alpha_{max}$ (i Est le rapport de réduction de la transmission lors du fonctionnement). Cela est également valable pour le couple résistant ramené à l'arbre rapide (arbre du moteur).
- la deuxième condition est d'obtenir sur le plat, la vitesse maximale $v_{veh-max}$ (Nécessaire pour le dépassement) du véhicule. Dans notre cas cette vitesse est égale à 110 km/h.

En l'absence de cahier des charges précis (confidentialité) sur un projet de motorisation, nous avons élaboré un cahier de charge résultant d'un compromis entre les exigences prédominantes des clients et les contraintes technologiques et économiques. Si l'accélération et la reprise sont des critères forts appréciés des amoureux des véhicules de sports les soucieux d'une économie à long terme mettent le point beaucoup plus sur la fiabilité.

II.5 Eléments basiques du cahier des charges

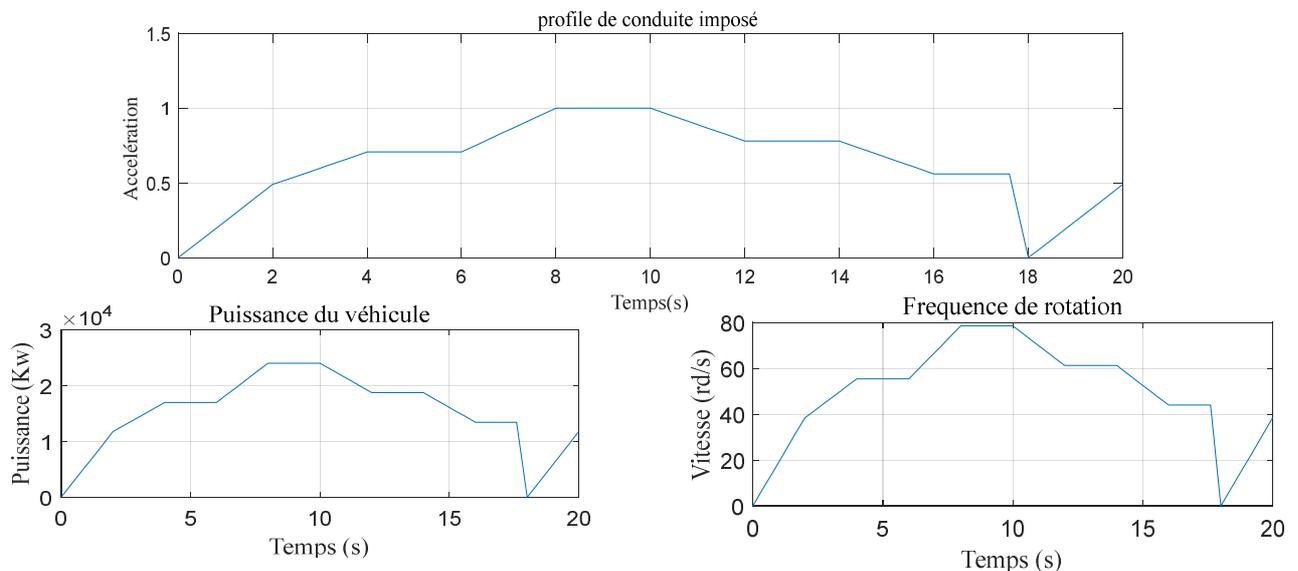
Le tableau II.1 rassemble l'essentiel des éléments du cahier des charges :

Tableau II.1 : Cahier des charges du véhicule électrique.

Charge utile maximale	500 Kg
Vitesse maximale	110 Km/h
Accélération	De 0 à 100km/h en moins 9s
Autonomie	160 Km
Temps de recharge	6.6 h
Dimension du véhicule	$L_v=4.084m$; $l_v=1.73m$; $h_v=1.562m$
Poids à vide	1000 Kg
Poids totale avec charge	1500 Kg
Puissance	34 Ch/ 25 Kw
Couple moteur	318 N.m
Fiabilité	Fonctionnement en mode dégradée
Moteur	synchrone double étoile

II.6 Résultats de simulations

Dans le but de déterminer les contraintes dynamique imposé sur le véhicule on a procéder à une simulation dynamique des déférentes forces exercées sur ce dernier pour un poids totale de 1500 kg et une vitesse max de 110 km/h et pour un profile ordinaire d'où $\alpha = 0$



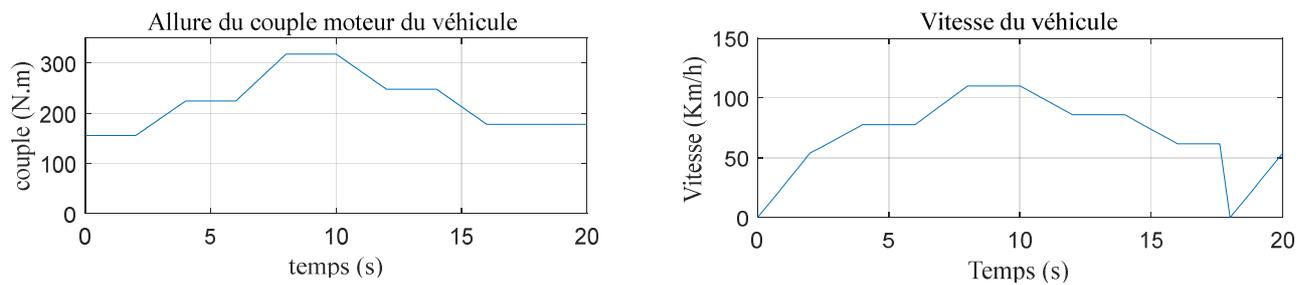


Figure II.8 : Résultats de simulation de la charge dynamique.

II.7 Description et modélisation de la machine utilisée

II.7.1 Description de la machine synchrone double étoile

La machine synchrone est constituée de deux parties, la partie mobile ou rotor constituant l'inducteur et une partie fixe ou stator portant deux enroulements constituant l'induit, la mince zone entre les deux parties précédentes est appelée l'entrefer [31]

a-Rotor : les enroulements parcourus par un courant continu (dans le cas de la machine a rotor bobiné) sont remplacés par des aimants permanents alternants pôles nord et pôles sud. Le flux inducteur balaye les enroulements statoriques et y induit des forces électromotrices (f-é-m) alternatives. L'interaction des champs rotorique et statorique donne naissance au couple électromagnétique.

b-Stator : il est similaire à celui de la machine asynchrone. Il se compose d'un bobinage distribué triphasé, tel que les forces électromotrices générées par la rotation du champ rotorique soient sinusoïdales ou trapézoïdales. Ce bobinage est logé dans les encoches creusées dans le circuit magnétique fixe. Ce dernier est feuilleté afin de réduire les courants de Foucault et de limiter les pertes dans le fer. Il est généralement construit en tôle à base d'alliage fer-silicium qui permet l'obtention d'une induction élevée dans notre cas nous avons opté pour un choix de configuration double étoile dans le stator qui consiste à un emplacement portant deux enroulements triphasés identiques et décalés d'un angle électrique $\alpha = 30^\circ$, La (figure.II.9) représente schématiquement les enroulements de la MSAPDE. Les angles θ_r et $(\theta_r - \alpha)$ représentent respectivement la position du rotor. [32]

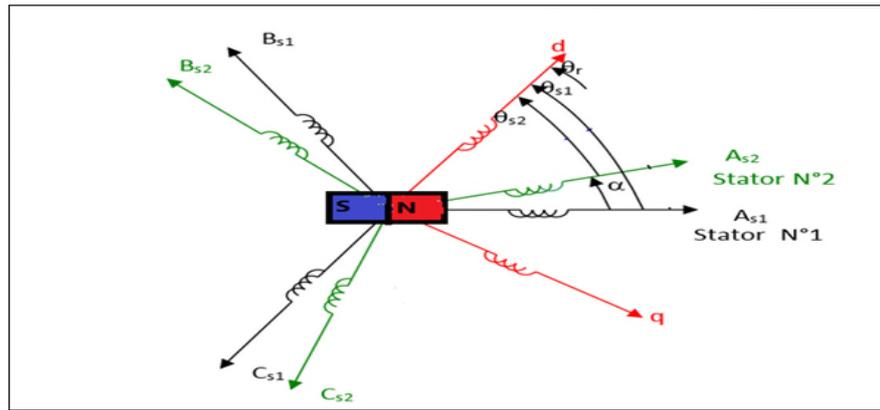


Figure II.9 : Représentation schématique des enroulements de la MSAPDE [32]

Le principe de fonctionnement de la chaîne de traction est fortement lié à la nature de la motorisation. En effet le véhicule est équipé d'une machine asynchrone double étoile. En fonctionnement normale la seconde étoile est déconnectée. Lors d'une accélération ou de la montée d'une pente, on fait appel à celle-ci pour le forcing afin de booster la puissance du moteur et offrir ainsi des bonnes performances d'accélération et de reprise. Durant le fonctionnement en mode dégradé, la deuxième étoile sera connectée de façon permanente à la source. [33]

Dans ces conditions, la motorisation peut fournir le couple nécessaire au fonctionnement jusqu'à la perte (dégradation) de 3/6 de ses phases.

Il importe de noter que la seconde étoile est alimentée par des supercondensateurs pour une grande réactivité c'est-à-dire un temps de réponse faible et une puissance délivrée maximale.

II.7.2 Modélisation de la machine synchrone double étoile (MSAPDE)

Le comportement dynamique de la MSAPDE est caractérisé par trois types de grandeurs : électrique, magnétiques et mécaniques. Ce comportement peut se traduire par trois types d'équations : équations électrique, équations magnétiques, et équations mécaniques.

Pour simplifier la modélisation de cette machine on choisit un modèle d'analyse tenant compte des hypothèses simplificatrices suivantes :

- la machine est non saturée
- les pertes fer et les l'effet amortisseur sans négligée
- les pertes par courant de Foucault et par hystérésis sont négligées

- l'effet de peau est négligé
- le couplage capacitif des enroulements est négligé
- la perméabilité des aimants est considérée comme de celle de l'air
- les f.e.m sont sinusoïdales

En conséquence, les inductances de la machine sont constantes et indépendantes de la position du rotor. [34]

II.7.3 Mise en équations de la MSDE dans le repère (abc)

a- Equations électrique

Stator 1 :

$$[V_{abc}]_{s1} = [R_{s1}][i_{abc}]_{s1} + \frac{d}{dt} [Q_{abc}]_{s1} \quad (\text{II.17})$$

Stator 2 :

$$[V_{a'b'c'}]_{s2} = [R_{s2}][i_{a'b'c'}]_{s2} + \frac{d}{dt} [Q_{a'b'c'}]_{s2} \quad (\text{II.18})$$

Rotor:

$$[V_f]_r = [R_f][i_f]_r + \frac{d}{dt} [Q_f]_r \quad (\text{II.19})$$

$[V_{abc}]_{s1} = [V_a \ V_b \ V_c]^T_s$: Vecteur tensions statorique 1

$[V_{a'b'c'}]_{s2} = [V_{a'} \ V_{b'} \ V_{c'}]^T_s$: Vecteur tensions statorique 2

$[V_f]_r = V_f$: Vecteur tension rotorique

$[i_{abc}]_{s1} = [i_a \ i_b \ i_c]^T_{s1}$: Vecteur courant statorique 1

$[i_{a'b'c'}]_{s2} = [i_{a'} \ i_{b'} \ i_{c'}]^T_{s2}$: Vecteur courant statorique 2

$[i_f]_r = I_f$: Vecteur courant rotorique

Où:

$$[R_{s1}] = \begin{bmatrix} R_{S1} & 0 & 0 \\ 0 & R_{S1} & 0 \\ 0 & 0 & R_{S1} \end{bmatrix} ; \quad [R_{s2}] = \begin{bmatrix} R_{S2} & 0 & 0 \\ 0 & R_{S2} & 0 \\ 0 & 0 & R_{S2} \end{bmatrix} ; \quad [R_f] = R_f$$

$$R_{S1} = R_{S2} = R_s$$

$$[i_{abc}]_{s1} = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}_{s1} ; \quad [i_{abc}]_{s2} = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}_{s2} ; \quad [i_f]_r = i_f$$

b- Equations magnétiques

Les équations des flux statoriques (étoiles 1 et 2) et rotoriques en fonction des courants sous forme matricielle sont données par :

$$[\varphi_{abc}]_{s1} = \begin{bmatrix} \varphi_{as1} \\ \varphi_{bs1} \\ \varphi_{cs1} \end{bmatrix} ; \quad [\varphi_{abc}]_{s2} = \begin{bmatrix} \varphi_{as2} \\ \varphi_{bs2} \\ \varphi_{cs2} \end{bmatrix} ; \quad [\varphi_f, r] = \varphi_f$$

$[\varphi_{abc}]_{s1}$; $[\varphi_{abc}]_{s2}$; $[\varphi_f]_r$: Matrices des flux statoriques de l'étoile 1,2 et du flux rotorique.

Les flux totalisés s'expriment sous la forme suivante :

$$\begin{bmatrix} \varphi_{s1} \\ \varphi_{s2} \\ \varphi_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [L_s(\theta)] & [M_{ss}] & [M_{sr}(\theta)] \\ [M_{ss}]^T & [L_s(\beta)] & [M_{sr}(\beta)] \\ [M_{sr}(\theta)]^T & [M_{sr}(\beta)] & [L_r] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{s1} \\ i_{s2} \\ i_r \end{bmatrix} \quad (\text{II.19})$$

Les sous matrices de la matrice des inductances sont :

$$[L_s(\theta)]_1 = \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{bmatrix} + L_{sf} \begin{bmatrix} \cos(2\theta) & \cos(2(\theta - \frac{2\pi}{3})) & \cos(2(\theta + \frac{2\pi}{3})) \\ -\sin(2(\theta - \frac{2\pi}{3})) & \cos(2(\theta + \frac{2\pi}{3})) & \cos(2\theta) \\ \cos(2(\theta + \frac{2\pi}{3})) & \cos(2\theta) & \cos(2(\theta - \frac{2\pi}{3})) \end{bmatrix}$$

(II.20)

En posant $\beta = \theta - \alpha$, la matrice des inductances du deuxième stator est :

$$[L_s(\theta)]_2 = \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{bmatrix} + L_{sf} \begin{bmatrix} \cos(2\beta) & \cos(2(\beta - \frac{2\pi}{3})) & \cos(2(\beta + \frac{2\pi}{3})) \\ -\sin(2(\beta - \frac{2\pi}{3})) & \cos(2(\beta + \frac{2\pi}{3})) & \cos(2\beta) \\ \cos(2(\beta + \frac{2\pi}{3})) & \cos(2\beta) & \cos(2(\beta - \frac{2\pi}{3})) \end{bmatrix}$$

(II.21)

La matrice des inductances mutuelles entre le premier stator et le second stator est :

$$\begin{aligned}
[M_{ss}] &= -2M_s \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & \cos(\alpha - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\alpha + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\alpha - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\alpha + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\alpha) \\ \cos(\alpha + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\alpha) & \cos(\alpha - \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \\
+L_{sf} &\begin{bmatrix} \cos(2(\theta - \alpha)) & \cos(2(\theta - \alpha) - \frac{2\pi}{3}) & \cos(2(\theta - \alpha) + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(2(\theta - \alpha) - \frac{2\pi}{3}) & \cos(2(\theta - \alpha) + \frac{2\pi}{3}) & \cos(2(\theta - \alpha)) \\ \cos(2(\theta - \alpha) + \frac{2\pi}{3}) & \cos(2(\theta - \alpha)) & \cos(2(\theta - \alpha) - \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (\text{II.22})
\end{aligned}$$

La matrice des inductances mutuelles entre le premier stator et le rotor est :

$$[M_{sr}(\theta)] = \begin{bmatrix} M_{sf} \cos(\theta) \\ M_{sf} \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ M_{sf} \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (\text{II.23})$$

La matrice des inductances mutuelles entre le deuxième stator et le rotor est :

$$[M_{sr}(\theta)] = \begin{bmatrix} M_{sf} \cos(\beta) \\ M_{sf} \cos(\beta - \frac{2\pi}{3}) \\ M_{sf} \cos(\beta + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (\text{II.24})$$

Comme le rotor est identique à celui d'une machine triphasée classique, les matrices des inductances propres au rotor restent inchangées.

L'inductance du rotor est :

$$[L_r] = \begin{bmatrix} L_f & M_{fd} & 0 \\ M_{fd} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{II.25})$$

Avec :

L_s, L_f : Matrice des Inductances propres des enroulements statoriques et rotorique respectivement

M_s : Matrice des Inductances mutuelles entre les deux enroulements statoriques

M_{sf} : Matrice des Inductances mutuelles entre les enroulements statoriques et rotorique.

M_{fd} : Matrice des Inductances mutuelles entre les enroulements rotorique

L'équation du couple électromagnétique est donnée par :

$$T_e = \frac{p}{2} \begin{bmatrix} [I_s] \\ i_f \end{bmatrix}^T \frac{d}{d\theta} \begin{bmatrix} [L_{ss}] & [M_{sr}] \\ [M_{sr}]^T & i_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [I_s] \\ i_f \end{bmatrix} \quad (\text{II.26})$$

c- Expression du couple électromagnétique

Le couple électromagnétique s'exprime par la dérivée partielle d'énergie électromagnétique stockée par rapport à l'angle géométrique de rotation du rotor.

$$C_{em} = \frac{1}{2} [i] \frac{\partial}{\partial t} [L][i] \quad (\text{II.27})$$

Avec :

$$[L] = \begin{bmatrix} [L_s(\theta)] & [M_{ss}] & [M_{sr}(\theta)] \\ [M_{ss}]^T & [L_s(\beta)] & [M_{sr}(\beta)] \\ [M_{sr}(\theta)]^T & [M_{sr}(\beta)] & [L_r] \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad [i] = \begin{bmatrix} i_{s1} \\ i_{s2} \\ i_r \end{bmatrix} \quad (\text{II.28})$$

Dans la base naturelle nous avons un système de neuf équations différentielles et une expression du couple dont certains coefficients font intervenir des fonctions sinusoïdales dues au mouvement du rotor ce qui complique la résolution analytique [35].

A cet effet, nous considérons une transformation qui offre le passage d'un système triphasé à un système biphasé équivalent.

d- Equation mécanique

L'étude des caractéristiques de la machine synchrone double étoile fait introduire de la variation non seulement des grandeurs électriques (tension, courant) mais aussi des grandeurs mécaniques (couple, vitesse) [38].

Donc l'expression de l'équation mécanique est donnée pa

$$j \frac{d\Omega}{dt} = C_{em} - C_r - K_f \Omega \quad (\text{II.29})$$

Avec :

$$\Omega = \frac{w_r}{p} \quad (\text{II.30})$$

$$w_r = \frac{d\theta_r}{dt} \quad (\text{II.31})$$

Avec :

J : Inertie totale des parties tournantes

K_f : Coefficient de frottement.

Ω : Vitesse de rotation rotorique de la machine

C_{em} : Couple électromagnétique.

C_r : Couple résistant (couple de charge)

II.7.4 Modèle biphasé de la MSAPDE

a- Transformation de Park

Le principe de la transformation de Park consiste à remplacer les grandeurs (courant, tension et flux) d'indices réelles a, b, c par des grandeurs d'indices d, q, o (direct, en quadrature et homopolaire) à l'aide de la matrice de Park $[p(\theta_{s1})]$. On transforme le système triphasé en un système biphasé tournant (Figure II.10). [36]-[37]

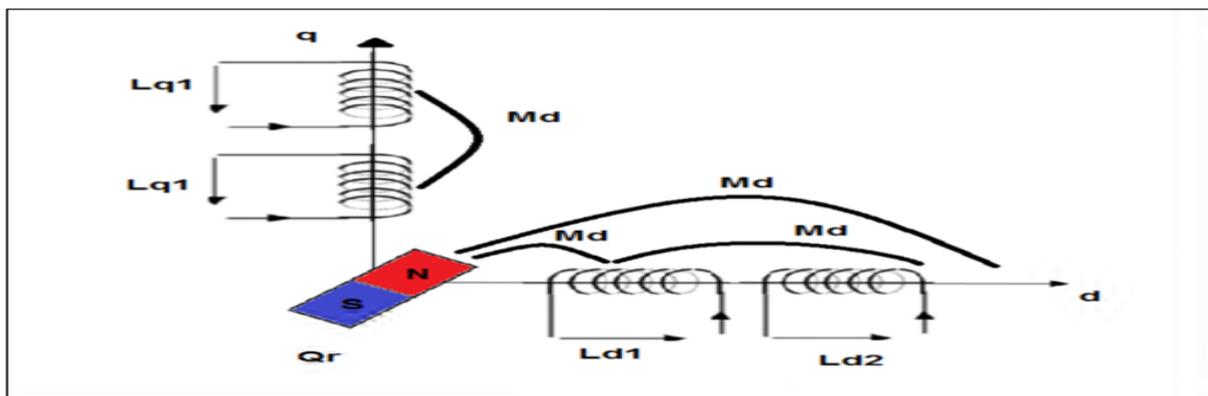


Figure II.10 : Représentation schématique de la machine dans le repère (d,q).

b- Equations électriques

L'équation de la tension est :

$$[V_{abc}]_{s1} = [R_{s1}][i_{abc}]_{s1} + \frac{d[\varphi_{abc}]_{s1}}{dt} \quad (\text{II.32})$$

Dans un référentiel lié au rotor :

$$[V_{d,q}]_{s1} = [p(\theta_{s1})][V_{abc}]_{s1} \quad (\text{II.33})$$

Avec $[p(\theta_{s1})]$ la matrice de transformation de Park donnée par :

$$[p(\theta_{s1})] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.34})$$

D'où, on obtient :

$$[p(\theta_{s1})][V_{abc}]_{s1} = [R_{s1}][p(\theta_{s1})][i_{abc}]_{s1} + [p(\theta_{s1})] \frac{d[\varphi_{abc}]_{s1}}{dt} \quad (\text{II.35})$$

Sachant que :

$$\frac{d([p(\theta_{s1})][\varphi_{abc}]_{s1})}{dt} = [p(\theta_{s1})] \frac{d[\varphi_{abc}]_{s1}}{dt} + \frac{d[p(\theta_{s1})]}{dt} [\varphi_{abc}]_{s1} \quad (\text{II.36})$$

Il vient :

$$[p(\theta_{s1})] \frac{d[\varphi_{abc}]_{s1}}{dt} = \frac{d([p(\theta_{s1})][\varphi_{abc}]_{s1})}{dt} - \frac{d[p(\theta_{s1})]}{dt} [\varphi_{abc}]_{s1} \quad (\text{II.37})$$

Comme la matrice de Park est une fonction de l'angle θ , on peut écrire :

$$\frac{d[p(\theta_{s1})]}{dt} [\varphi_{abc}]_{s1} = \frac{dt}{t} \left(\frac{d[p(\theta_{s1})]}{d\theta} \right) [\varphi_{abc}]_{s1} \quad (\text{II.38})$$

En dérivant la matrice de Park par rapport à l'angle électrique on obtient :

$$\frac{d[p(\theta_{s1})]}{d\theta} = -\sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \sin(\theta_{s1}) & \sin(\theta_{s1} - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta_{s1} + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_{s1}) & \cos(\theta_{s1} - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_{s1} + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.39})$$

On obtient l'équation (II.31) :

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix}_{s1} = R_{s1} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix}_{s1} + \begin{bmatrix} \frac{d}{dt} & -w_r \\ w_r & \frac{d}{dt} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varphi_d \\ \varphi_q \end{bmatrix}_{s1} \quad (\text{II.40})$$

La tension du deuxième stator est :

$$[V_{abc}]_{s2} = [R_{s2}][i_{abc}]_{s2} + \frac{d[\varphi_{abc}]_{s2}}{dt} \quad (\text{II.41})$$

En multipliant l'équation (II.41) par la matrice de transformation de Park du deuxième stator, on obtient :

$$[p(\theta_{s2})][V_{abc}]_{s2} = [R_{s2}][p(\theta_{s2})][i_{abc}]_{s2} + [p(\theta_{s2})] \frac{d[\varphi_{abc}]_{s2}}{dt} \quad (\text{II.42})$$

Sachant que la matrice de transformation du deuxième stator est :

$$[[p(\theta_{s2})]] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta_{s2} - \alpha) & \cos(\theta_{s2} - \alpha - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_{s2} - \alpha + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta_{s2} - \alpha) & -\sin(\theta_{s2} - \alpha - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_{s2} - \alpha + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.43})$$

Les tensions dans le repère (d,q) sont exprimées par :

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix}_{s2} = R_{s2} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix}_{s2} + \begin{bmatrix} \frac{d}{dt} & -\omega_r \\ \omega_r & \frac{d}{dt} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varphi_d \\ \varphi_q \end{bmatrix}_{s2} \quad (\text{II.44})$$

L'enroulement inducteur est modélisé sur l'axe d par :

$$[V_f]_r = [R_f][i_f]_r + \frac{d}{dt} [Q_f]_r \quad (\text{II.45})$$

c- Equations magnétiques

$$\begin{aligned} [p(\theta_{s1})][\varphi_{abc}, S_1] &= [p(\theta_{s1})][L_s(\theta)][i_{abc}]_{s1} \\ &+ [p(\theta_{s1})][M_{ss}][i_{abc}]_{s2} + [p(\theta_{s1})][M_{sr}(\theta)][i_r] \end{aligned} \quad (\text{II.46})$$

En faisant le produit matriciel $= [p(\theta_{s1})][L_s(\theta)][i_{abc}]_{s1}$

On obtient :

$$L_d = L_s - M_{s1s2} + \frac{3}{2} L_{sf} \quad (\text{II.47})$$

L_d : est l'inductance direct.

$$L_q = L_s - M_{s1s2} - \frac{3}{2} L_{sf} \quad (\text{II.48})$$

L_q : est l'inductance en quadratique.

Et en faisant le produit matriciel $[p(\theta_{s1})][M_{ss}][i_{abc}]_{s2}$, nous aurons :

$$M_d = -3M_s - \frac{3}{2} L_{mfs} \quad (\text{II.49})$$

M_d : est la mutuelle inductance entre les enroulements d_1 et d_2 .

$$M_q = -3M_s - \frac{3}{2}L_{mfs} \quad (\text{II.50})$$

M_q : Est la mutuelle inductance entre les enroulements q_1 et q_2 .

Finalement, les expressions des flux deviennent :

Stator 1

$$\varphi_{sd1} = L_d i_{d1} + M_d i_{d2} + M_{fd} i_f \quad (\text{II.51})$$

$$\varphi_{sq1} = L_q i_{q1} + M_q i_{q2} \quad (\text{II.52})$$

Il est de même pour le second stator :

$$\varphi_{sd2} = L_d i_{d2} + M_d i_{d1} + M_{fd} i_f \quad (\text{II.53})$$

$$\varphi_{sq2} = L_q i_{q2} + M_q i_{q1} \quad (\text{II.54})$$

L'expression du flux rotorique :

$$\varphi_f = L_f i_f + M_{df} (i_{d1} i_{d2}) \quad (\text{II.55})$$

L'équation du couple électromagnétique est donnée par :

$$C_{em} = C_{em1} + C_{em2} \quad (\text{II.56})$$

$$C_{em1} = P(\varphi_{sd1} i_{q1} - \varphi_{sq1} i_{d1}) \quad (\text{II.57})$$

$$C_{em2} = P(\varphi_{sd2} i_{q2} - \varphi_{sq2} i_{d2}) \quad (\text{II.58})$$

D'où le couple :

$$C_{em} = P(\varphi_{sd1} i_{q1} + \varphi_{sq1} i_{d1} - \varphi_{sd2} i_{q2} - \varphi_{sq2} i_{d2}) \quad (\text{II.59})$$

Dans le cas d'une machine synchrone à aimant permanent :

Les équations Magnétique deviennent

Stator 1

$$\varphi_{sd1} = L_d i_{d1} + M_d i_{d2} + \varphi_f \quad (\text{II.60})$$

$$\varphi_{sq1} = L_q i_{q1} + M_q i_{q2} \quad (\text{II.61})$$

Il est de même pour le second stator :

$$\varphi_{sd2} = L_d i_{d2} + M_d i_{d1} + \varphi_f \quad (\text{II.62})$$

$$\varphi_{sq2} = L_q i_{q2} + M_q i_{q1} \quad (\text{II.63})$$

L'expression du flux rotorique :

$$\varphi_f = \text{constante}$$

II.8 Autopilotage

Le moteur synchrone, comme son nom l'indique, tourne à la vitesse synchrone, qui est liée uniquement à la fréquence des tensions d'alimentation. Pour assurer la variation de la vitesse, on va utiliser le principe d'autopilotage, qui consiste à maintenir un angle constant entre le champ magnétique statorique par rapport au champ magnétique du rotor. Pour pouvoir piloter correctement le champ statorique, la position du rotor sera récupéré à l'aide d'un capteur de position angulaire fournissant une information continue sur la position du rotor et à l'aide d'un onduleur commandé, nous pourrons ajuster la phase des tensions du stator donc leur fréquence [38].

La machine synchrone autopilotée est un dispositif à vitesse variable alimenté par convertisseur statique où la fréquence d'alimentation est asservie à la vitesse de rotation. Cela veut dire que la machine prescrit elle-même sa fréquence. L'alimentation de la machine synchrone autopilotée se fait selon deux modes

➤ Alimentation directe :

Ce système d'entraînement est aussi connu sous le nom de la machine à cycloconvertisseurs un tel système est utilisé pour des machines de puissance élevée et basse vitesse.

➤ Alimentation indirecte :

Dans ce cas la machine est alimentée par un convertisseur statique à circuit intermédiaire .ce convertisseur est constitué du coté réseau d'un redresseur alimentant à travers un filtre un onduleur de tension ou de courant.

Après avoir implanté le modèle électromécanique de la MSAPDE sous l'environnement MATLAB/Simulink, nous l'avons alimenté avec des sources équilibrés purement sinusoïdales dont la seconde est décalée électriquement d'un angle $\alpha = \frac{\pi}{6}$ par rapport à la première.

II.8.1 Résultats de simulation et interprétation

Afin de s'assurer du bon fonctionnement de notre machine on a procédé à une simulation en boucle ouverte (principe de l'autopilotage) pour confirmer qu'il existe réellement un décalage angulaire entre le champ statorique et le champ rotorique, on a démarré avec un couple nominal puis à l'instant $t=5s$ on a appliqué un couple de décharge de 250 N.m.

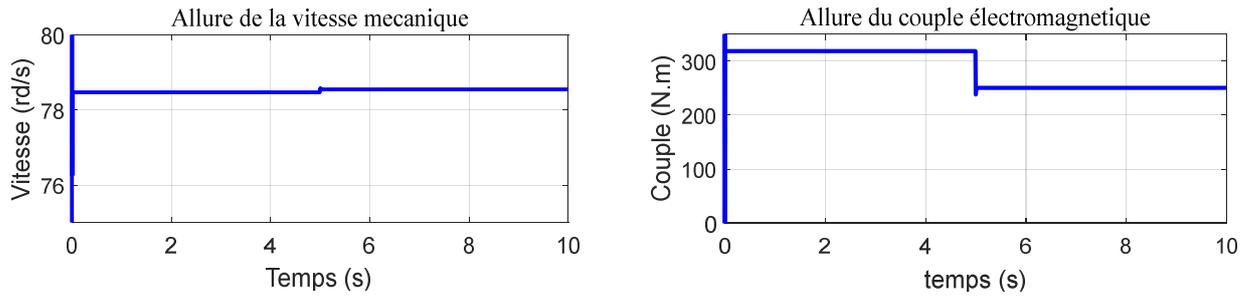


Figure II.11 :Couple électromagnétique et vites mécanique.

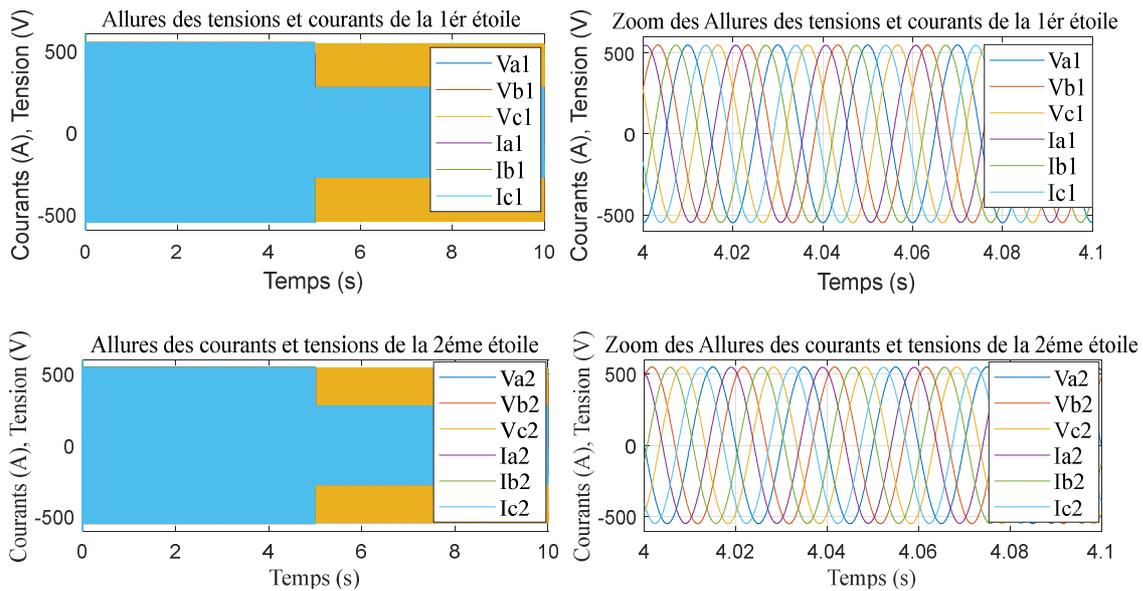


Figure II.12 : Tension et courants de la 1er et 2eme étoile.

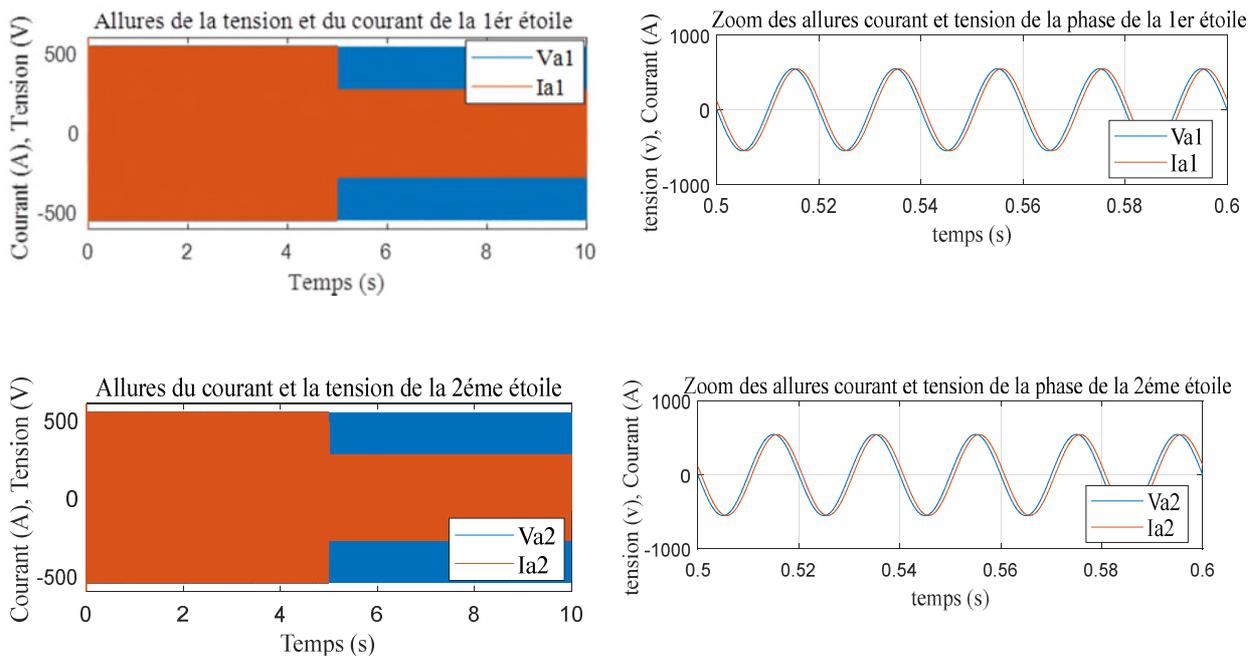
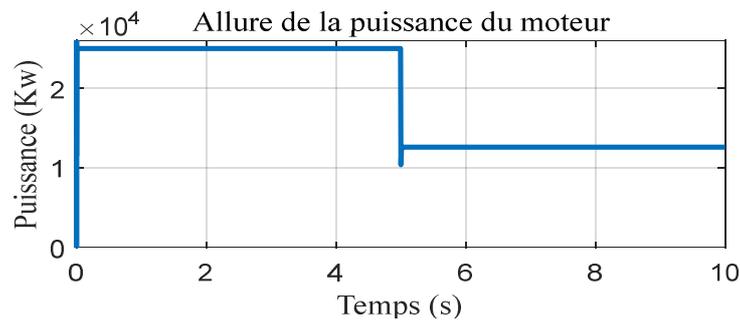
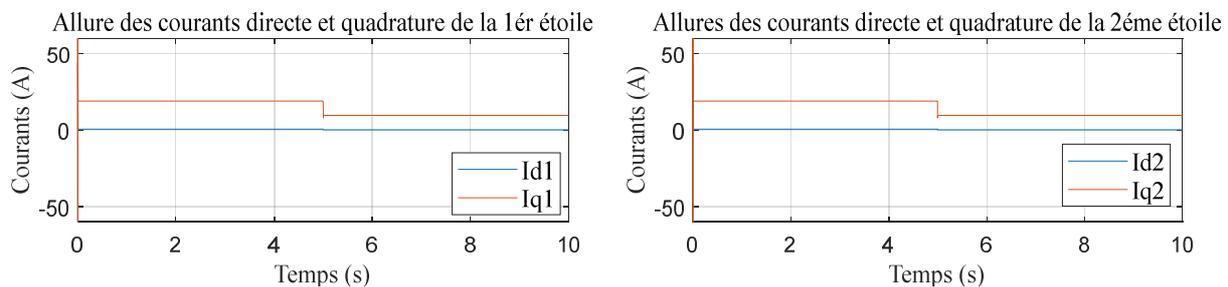


Figure II.13 : Tension et courants d'une phase de 1er et 2eme étoile.**Figure II.14 :** Puissance du moteur.**Figure II.15:** Les courants quadrature et direct de la 1ere et 2eme étoile.

Interprétation des résultats

- Au démarrage le couple électromagnétique atteint une valeur maximale en régime transitoire puis il diminue d'une façon linéaire et se stabilise à $T=0.5$ s, et qui reste constant jusqu'à $T=5$ s puis on applique un couple résistive de 250 N.m.
- La pulsation des grandeurs électrique statorique ω_e à $T=0$ est d'ordre 314 rad/s et reste constante jusqu'au temps d'application d'un couple résistive à $T=5$ s, on constate que ω_e augment pendant que le couple diminue, donc il existe un couple entre le flux et le couple.
- Les signaux des courants statoriques sont de forme sinusoïdale qui suivant l'allure du couple électromagnétique qui lui suit le couple charge qui est de 250 N.m à $T=5$ s, qui est le même cas pour les courant de quadrature qui eux aussi suivent l'allure du couple électromagnétique.

II.9 Alimentation de la MSAPDE par onduleurs de tension à commande M.L.I

II.9.1 Modélisation de l'onduleur

Un onduleur autonome (à commande adjacente ou à M.L.I) est un convertisseur statique qui assure la transformation de l'énergie d'une source continue en une énergie alternative, qui peut être à fréquence fixe ou variable [39].

Le contrôle de la vitesse et du couple de la MSAPDE se réalise par action simultanée sur la fréquence et sur l'amplitude de la tension statorique, à base d'onduleurs de tension à fréquence variable.

Chaque étoile de la MSAPDE est connectée à un onduleur triphasé à commutations commandées. Ce dernier est constitué de trois branches ou chacune est composée de deux paires d'interrupteurs supposés parfaits et dont les commandes sont disjointes et complémentaires; chaque interrupteur est représenté par une paire transistor-diode qui est modélisée par deux états définis par la fonction de connexion logique suivante [30] [33]:

$$f_i = \begin{cases} 1 & \text{l'interrupteur } i \text{ est fermé } k_i \text{ conduit, } \bar{k}_i \text{ bloqué} \\ 0 & \text{l'interrupteur } i \text{ est ouvert } k_i \text{ bloqué, } \bar{k}_i \text{ conduit} \end{cases}$$

Avec : $f_i + \bar{f}_i = 1$ et $i = 1 \dots 3$;

La (figure.II.12) représente le schéma d'un onduleur triphasé.

Les tensions composées sont

$$\begin{cases} V_{AC} = V_{as1} - V_{bs1} = E(f_1 - f_2) \\ V_{BC} = V_{bs1} - V_{cs1} = E(f_2 - f_3) \\ V_{CA} = V_{cs1} - V_{as1} = E(f_3 - f_1) \end{cases} \quad (\text{II.64})$$

Les tensions simples V_{as1} , V_{bs1} et V_{cs1} forment un système triphasé équilibré, tel que :

$$V_{as1} + V_{bs1} + V_{cs1} = 0 \quad (\text{II.65})$$

La résolution d'équations (II.64) et (II.65) nous donne :

$$\begin{bmatrix} V_{as1} \\ V_{bs1} \\ V_{cs1} \end{bmatrix} = \frac{E}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{bmatrix} \quad (\text{II.66})$$

Pour le second onduleur, on obtient :

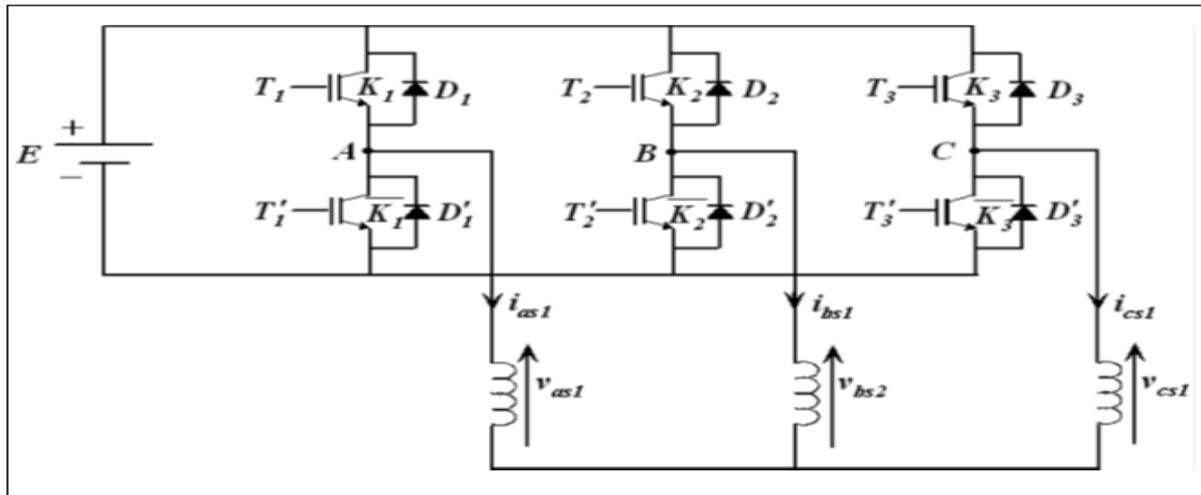


Figure II.16 : schéma d'un onduleur triphasé.

$$\begin{bmatrix} V_{as2} \\ V_{bs2} \\ V_{cs2} \end{bmatrix} = \frac{E}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_4 \\ f_5 \\ f_6 \end{bmatrix}$$

II.10 Convertisseur de puissance (Hacheur élévateur – abaisseur ou buckboost)

Les convertisseurs DC/DC ont pour rôles d'adapter les niveaux de tension des sources à la valeur du bus continu nécessaire pour alimenter l'onduleur. C'est le fonctionnement élévateur du convertisseur.

Par ailleurs ils assurent la récupération de l'énergie en régime de freinage. C'est le fonctionnement abaisseur, cette énergie récupérée servira à recharger les sources.

Il convient de noter que les sources utilisées sont caractérisées par des tensions fluctuantes. En effet la tension à leurs bornes chute en fonction de la décharge, ce qui peut se traduire par une diminution des performances de la chaîne de traction. Pour éviter ce dysfonctionnement et assurer une haute performance à tout instant, nous avons intégré une régulation de la tension au niveau des convertisseurs DC/DC afin de maintenir celle-ci constante. Ainsi le transfert de la puissance qui regroupe (U et I) se retrouve totalement gouverné par le courant. [40]-[41]

II.11 Sources d'énergie

II.11.1 Batterie chimique

Dans une application de traction le poids à embarquer est une contrainte majeure. Ceci étant un choix rigoureux de la source s'impose. Avant de faire ce choix nous avons procédé à une étude comparative des différents modèles déjà cités dans le chapitre I en prenant en considération plusieurs critères de performances :

- Energie spécifique (W.h/kg) ;
- Puissance spécifique (W/kg) ;
- Rendement charge – décharge ;
- Durée de vie ;
- Coût spécifique.

A l'issue de cette étude basée sur les caractéristiques des différentes types de batteries existants sur le marché (Tableau I.2). Il s'affiche clairement que la batterie lithium-ion offre le meilleur compromis. Notre choix s'est donc porté sur celle-ci.

II.11.2 Modélisation et simulation de la batterie lithium-ion

Il existe plusieurs modèles de batterie. Plus on prend en considération les phénomènes électrochimiques plus le modèle est complexe. Cependant en faisant recours à quelques hypothèses simplificatrices on peut aboutir à des modèles simples mais suffisamment représentatifs.

Dans ce travail, on a opté pour le modèle de Shepherd dont la mise en équation est donnée ci-dessous. [35]

$$\text{En Charge } V = E_0 + K \frac{Q}{Q - it} it + K \frac{Q}{it - 0.1Q} i + Ri + Ae^{(-B.it)} \quad (\text{II.67})$$

$$\text{En Décharge } V = E_0 + K \frac{Q}{Q - it} it + K \frac{Q}{Q - 0.1it} i + Ri + Ae^{(-B.it)} \quad (\text{II.68})$$

Avec

V : Voltage actuel de la batterie, E_0 : Voltage constant de la batterie, K : Résistance de polarisation, Q : capacité maximale de la batterie, it : Charge actuelle de la batterie, R :résistance interne de la batterie, i : courant de la batterie, A : Amplitude de la tension de la zone exponentielle, B : Inverse de la capacité de la zone exponentielle.

$$SOC(t) = SOC_{unit} - \int_{t_0}^t \frac{I_b dt}{Q} \quad (\text{II.69})$$

Avec :

$SOC(t)$: État de charge de la batterie à l'instant t ; SOC_{unit} : État de charge à l'état initial ; I_b : Courant de décharge de la batterie ; Q : Charge nominale de la batterie ; $\int_{t_0}^t I_b dt$: Charge délivrée par la batterie à l'instant t (charge actuelle).

En réalité une batterie est constituée d'éléments de bases appelés cellules. La tension de la batterie (pack) est donc un multiple de la tension de l'élément de base. Cette tension nominale dépend de la technologie de l'accumulateur. L'ensemble de plusieurs cellules forment un module et l'ensemble de plusieurs modules forment le pack. Le principe est le suivant : pour chaque type d'accumulateur nous procéderons à la modélisation et à la simulation d'une cellule élémentaire avant de passer au dimensionnement et à la simulation du pack complet. Une étude comparative sera éventuellement menée afin de valider le modèle élémentaire et ainsi garantir l'exactitude du modèle du pack.

Dans notre cas, l'élément est caractérisé par une tension de 3.6V et une capacité de 3.2 Ah.

II.11.2.1 Modélisation du pack à partir du modèle unitaire

Soient N_s le nombre de cellule en série et N_p le nombre de cellule en parallèle.

Les grandeurs caractéristiques du pack s'obtiennent comme suit [42]:

$$V_{pack} = N_s V_{cb} \quad (\text{II.70})$$

$$R_{pack} = (N_s/N_p) R_{cb} \quad (\text{II.71})$$

$$Q_{pack} = N_p Q_{cb} \quad (\text{II.72})$$

Avec :

V_{cb}, R_{cb}, Q_{cb} : Respectivement la tension, la résistance interne et la capacité d'une cellule.

II.11.2.2 Résultats de simulation

Pour pouvoir visualiser le comportement de notre pack batteries face aux différents courants de décharge, on a simulé trois packs de même répartition mais pas de même état de charge, pour des courants de décharges de 180A, 160A, 140A respectivement

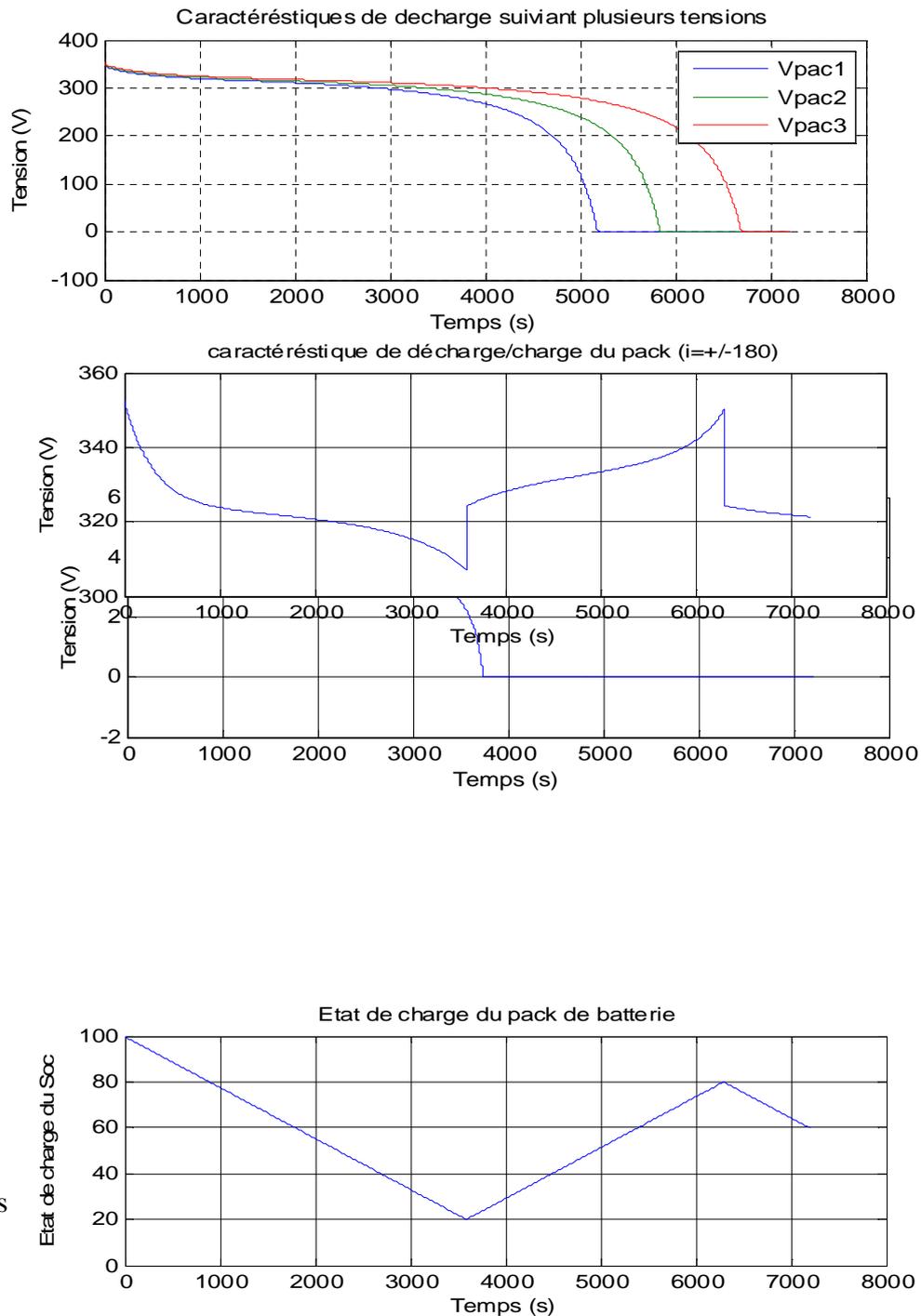


Figure Résultats

II.17: de

simulation du Pack de batterie.

La caractéristique de décharge montre trois zones. Une zone caractérisée par une chute de tension correspondant à la zone exponentielle, une zone dont la tension demeure pratiquement constante. C'est la zone de fonctionnement normal. Et enfin, une zone marquée par une chute brutale de tension. Notons au passage qu'il ne faut jamais faire fonctionner la batterie durant cette avalanche de tension car d'après les constructeurs cela peut engendrer des réactions irréversibles pouvant être à l'origine de la destruction de celle-ci. [43]-[44]

L'allure du SOC décroît durant la décharge de 100% à 20% et croît durant la charge. Ce résultat n'est fortuite car nous avons limité la profondeur de décharge à 80% ce qui signifie que la batterie contient au moins 20% de sa capacité totale.

La caractéristique de la décharge/charge montre une phase de décharge suivie d'une phase de charge. Lors de la recharge on note une légère surtension due à la résistance interne de la batterie.

II.11.3 Modélisation et simulation du pack des supercondensateurs

Afin de remédier aux problèmes de surdimensionnement des batteries dans le VE, les supercondensateurs présentent des propriétés très intéressantes en termes de stockage d'énergie. Du fait de leur faible densité d'énergie et leur densité de puissance importante, le SC sera sollicité lors des phases transitoires pour fournir les pics de puissance demandée. Pour la simulation [43]-[44]-[45]

II.11.3.1 Modélisation d'une cellule élémentaire de supercondensateur

Afin de modéliser les supercondensateurs, les constructeurs utilisent la similitude entre le comportement de ces derniers et celui des condensateurs électrolytiques. Pour cela un SC peut-être caractérisé par une résistance série ($R_{\text{élé}}m$) et une capacité de stockage ($C_{\text{élé}}m$) [35] (voir la figure.II.14).

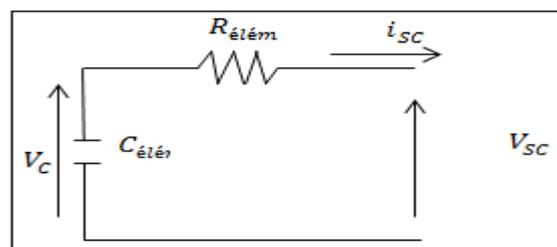


Figure II.18 : Model d'un élément du Sc.

Définissons la convention utilisée pour l'analyse de ce circuit. Les puissances sont définies par :

$$\begin{cases} P_{SC} = V_{SC} I_{SC} \\ P_C = V_C I_{SC} \end{cases} \quad (\text{II.73})$$

La convention utilisée est : $P_{SC} > 0$ En traction (décharge du pack SC).

$P_{SC} < 0$ En freinage (charge du pack SC).

Soit Q' la quantité de charge stockée sur l'armature du SC, elle s'écrit :

$$Q'(t) = V_c(t)C_{\text{élé}} \quad (\text{II.74})$$

Les caractéristiques électriques (I , P , E) du SC sont donc :

$$I_{SC}(t) = -\frac{dQ'(t)}{dt} = -\frac{d}{dt}[V_c(t)C_{\text{élé}}] = -C_{\text{élé}}\frac{dV_c(t)}{dt} \quad (\text{II.75})$$

$$P_C(t) = V_c(t)I_{SC}(t) = C_{\text{élé}}V_c(t)\frac{dV_c(t)}{dt} \quad (\text{II.76})$$

$$E_{1 \rightarrow 2}(t) = \int_{\tau_1}^{\tau_2} P_C(t)dt = \int_{\tau_1}^{\tau_2} C_{\text{élé}}V_c(t)dV_c(t) = \left[\frac{1}{2}C_{\text{élé}}V_c^2 \right]_{V_{C1}}^{V_{C2}} \quad (\text{II.77})$$

L'énergie maximale E_{max} contenue dans un SC est calculée pour la tension nominale V_{C_serv} :

$$E_{max} = \frac{1}{2}C_{\text{élé}}V_{C_serv}^2 \quad (\text{II.78})$$

La profondeur de décharge k est définie par le rapport entre la tension minimale V_{Cmin} d'un élément et la tension maximale V_{Cmax} d'un élément : $k = \frac{V_{Cmin}}{V_{Cmax}}$

L'énergie maximale utilisable E_{util} est calculée entre la tension maximale et la tension minimale de service :

$$E_{util}(t) = \left[\frac{1}{2}C_{\text{élé}}V_c^2 \right]_{V_{Cmin}}^{V_{Cmax}} = (1 - k^2)E_{max} \quad (\text{II.79})$$

Pour un rapport $k = \frac{1}{2}$ l'énergie utile vaut $E_{util} = \frac{3}{4}E_{max}$. Cela sous-entend que 75% seulement de l'énergie maximale disponible pourra être extraite. A titre d'exemple si on veut extraire 90% de l'énergie maximale disponible il faut opter pour un rapport $k = \frac{1}{3}$. Puisque ce rapport dépend de la technologie de l'accumulateur on s'en servira comme critère de choix dans notre travail.

L'énergie d'un élément est donc définie par :

$$E_{\text{élé}}(t) = \frac{1}{2}C_{\text{élé}}V_c^2(t) \quad (\text{II.80})$$

II.11.3.2 Modélisation du pack de Supercondensateurs

Tout comme la batterie l'utilisation de SC comme système de stockage d'énergie à bord du véhicule passe par la réalisation d'un pack en associant plusieurs éléments en série et en parallèle. [46]

Donc le pack SC sera constitué des cellules branchées en série (N_S) et/ou en parallèle (N_P) dont le modèle équivalent est un condensateur $C_{\text{élé}}m$ en série avec une résistance $R_{\text{élé}}m$.

$$C_{\text{pack_SC}} = \frac{N_P}{N_S} C_{\text{élé}}m \quad (\text{II.81})$$

$$R_{\text{pack_SC}} = \frac{N_S}{N_P} R_{\text{élé}}m \quad (\text{II.82})$$

De la même manière, nous trouvons

$$\begin{cases} V_{\text{pack_C}} = N_S V_{\text{élé}}m \\ I_{\text{pack_SC}} = N_P I_{\text{élé}}m \end{cases} \quad (\text{II.83})$$

L'énergie du pack E_{pack} de SC est donnée par :

$$E_{\text{pack}} = \frac{1}{2} C_{\text{pack_SC}} V_{\text{pack_c}}^2 = N_S N_P \left(\frac{1}{2} C_{\text{élé}}m V_{\text{élé}}m^2 \right) \quad (\text{II.84})$$

De même, la puissance du P_{pack} du pack s'écrit :

$$P_{\text{pack}} = V_{\text{pack_C}} I_{\text{pack_SC}} - R_{\text{pack_SC}} I_{\text{pack_SC}}^2 = N_S N_P (V_{\text{élé}}m I_{\text{élé}}m - R_{\text{élé}}m I_{\text{élé}}m^2) \quad (\text{II.85})$$

L'état de charge, appelé SOC, caractérise la quantité d'énergie présente dans le pack, il vaut «1» lorsque le pack est complètement chargé et «0» lorsqu'il est chargé à sa valeur minimale :

$$SOC = \frac{1}{1 - k^2} \left(\frac{E_{\text{pack}}}{E_{\text{pack_max}}} - k^2 \right) = \frac{1}{1 - k^2} \left(\frac{V_C^2}{V_{Cmax}^2} - k^2 \right) \quad (\text{II.86})$$

Pour notre application, on a opté pour un rapport $k = \frac{1}{3}$.

$$SOC = \frac{9}{8} \left(\frac{E_{\text{pack}}}{E_{\text{pack_max}}} - \frac{1}{9} \right) \quad (\text{II.87})$$

II.11.3.3 Résultats de simulation

Dans le but de voir le changement interne des supercondensateurs, de la tension, état de charge, et le comportement des courants de décharge après simulation a on aboutit à ces résultats.

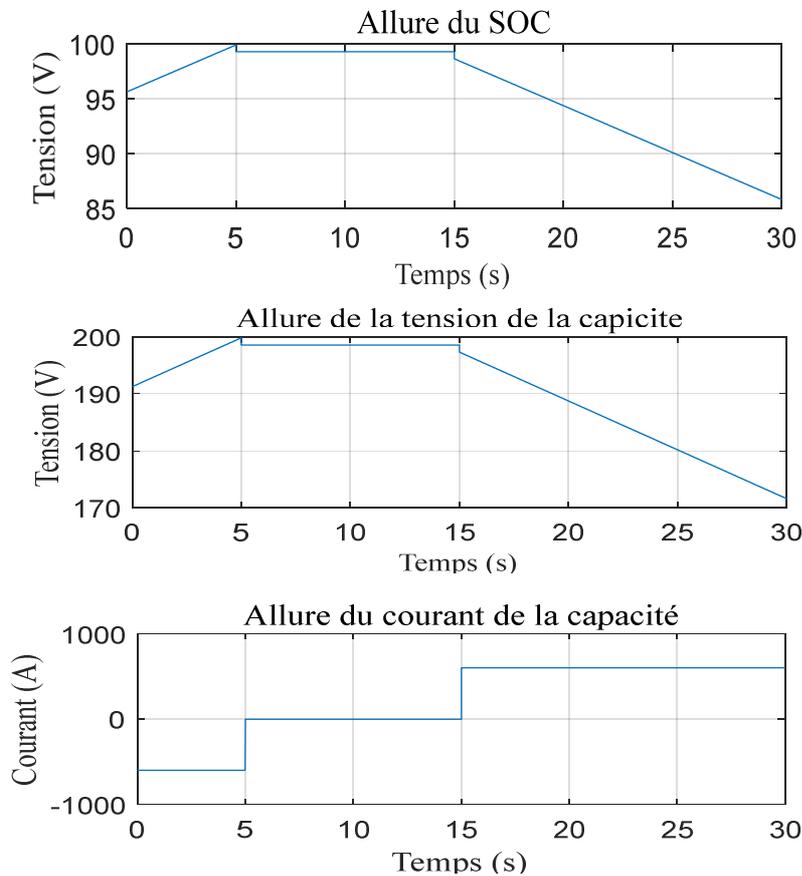


Figure II.19 : Résultats de simulation des supercondensateurs

D'une part du fait de la simplicité du modèle utilisé, et d'autre part ne disposant pas d'un modèle préexistant sur Matlab on s'est en passer de l'étude comparative. Toutefois, les remarques sur l'évolution du SOC établies avec la batterie avec la batterie restent valables pour le supercondensateur.

II.12 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté la modélisation des différentes parties de la chaîne de traction du véhicule électrique. Pour faire un choix de la machine qui devrait faire fonctionner notre véhicule dans les deux cas possible (traction avant, traction arrière) quel que soit le profil abordé, il est donc nécessaire en premier lieu de connaître les forces que notre moteur devrait vaincre, ces forces sont intégralement liées à la dynamique du véhicule. En deuxième lieu on doit fixer un cahier des charges qui sera une réponse à la problématique de

la dynamique. Et faire un choix du système d'alimentation qui devrait satisfaire la demande en puissance du moteur afin d'optimiser l'énergie à bord du véhicule, une étude plus détaillée est présente dans le chapitre suivant. La visualisation de la machine synchrone à aimant permanent en autopilotage à permet d'obtenir des résultats qui ont permet de valider le modèle de la machine.

CHAPITRE III

III.1 Introduction

Avec l'évolution des technologies, les sources d'énergie électrique prennent une place de plus en plus importante dans le monde industriel d'aujourd'hui. Le développement technologique actuel des batteries n'assure, au système qu'elles alimentent, qu'une autonomie très limitée. De plus, faire subir aux batteries des régimes de fortes fluctuations de puissance, altère énormément leur fiabilité et leur durée de vie. Ces inconvénients peuvent être diminués en insérant une nouvelle source énergétique fiable capable de fournir les pics de puissance au moment opportun. Les supercondensateurs, étant donné leur bonne durée de vie, leur forte densité de puissance et leur grande aptitude à se charger et à se décharger rapidement, sont des candidats plausibles pour assurer cette fonction

L'objectif de ce chapitre est de présenter le contexte du travail de thèse. En premier lieu, la situation énergétique mondiale liée à l'exploitation de l'énergie est abordée. L'usage des véhicules électriques est ensuite mis en relief. Puis, l'évolution des systèmes de stockage dans ceux-ci est présentée. Les différentes technologies de batteries lithium-ion existantes et les problèmes liés à leur exploitation sont abordés. Des alternatives permettant d'atténuer ces problématiques sont ensuite exposées. Le développement des systèmes de stockage porte aujourd'hui principalement sur l'intégration de nouvelles sources d'énergie de stockage et sur le concept d'hybridation des sources. L'état de l'existant en ce qui concerne la gestion énergétique des systèmes de stockage multi-sources sera présentée. La mise en œuvre des techniques avancées de contrôle et de gestion de ce type de système de stockage peut permettre d'optimiser les performances (durée de vie et coût) de l'ensemble. Enfin, les points clés sur lesquels nous apporterons notre contribution seront mis en exergue. Les démarches scientifiques et les objectifs à atteindre durant cette thèse seront finalement décrits.

III.2 Principe de la commande vectorielle de la MSAPDE

Le principe du découplage permet de modéliser la machine synchrone comme une machine à courant continu, par application de cette nouvelle technique de commande. Ceci concilie les avantages des propriétés du moteur à courant continu et de l'absence du collecteur mécanique (figure(III.1)). Le contrôle du couple d'une machine alternative nécessite un contrôle en phase et en amplitude des courants d'alimentation d'où le nom de contrôle vectoriel. Pour réaliser un contrôle similaire à celui des machines à courant continu à excitation séparée, il est nécessaire de maintenir le courant I_{d1} nul et de réguler la vitesse ou la position par le courant I_{q1} via la tension V_{q1} . Physiquement, cette stratégie revient à

maintenir le flux de réaction d'induit en quadrature avec le flux rotorique produit par le système d'excitation.

La commande vectorielle sert alors à contrôler les deux composantes (I_{d1}), (I_{q1}), du courants statorique, en imposant les tensions (V_{d1}) et (V_{q1}) qui conviennent. Quand le courant (I_{d1}) est nul, le modèle de la MSAPDE se réduit à sa représentation sur l'axe (q), identique à celui d'une MCC a excitation séparée

Le principe de correction (régulation) consiste à réguler les courants statorique et la vitesse à partir des grandeurs de référence (désirées) par les régulateurs classiques PI. [13]

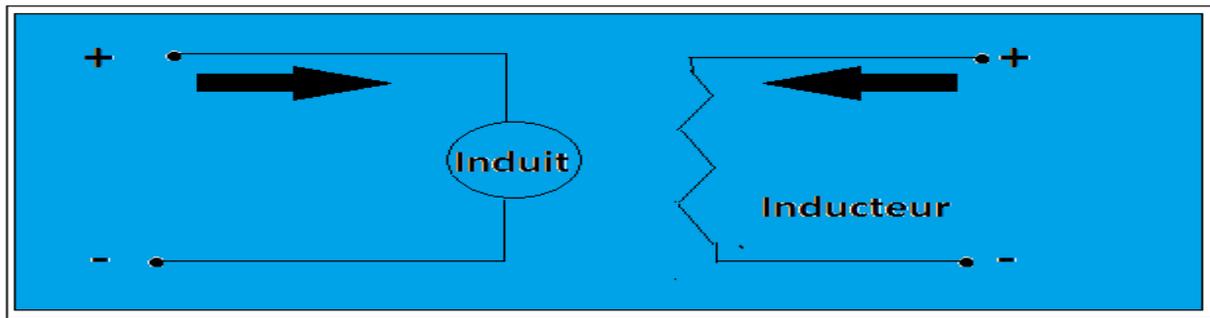


Figure III.1 : Machine à courant continue

III.2.1 Technique de découplage

Les lois de commande vectorielle de la machine alimentée en tension présente des couplages entre les actions sur les axes (d) et (q). Dans un repère (d) et (q) avec l'axe (d) aligné sur le flux rotorique, on a les équations suivantes :

$$V_{d1} = R_s \cdot I_{d1} + L_{d1} \frac{di_{d1}}{dt} - W_m \cdot L_{q1} i_{q1} \quad (\text{III.1})$$

$$V_{q1} = R_s \cdot I_{q1} + L_{q1} \frac{di_{q1}}{dt} + W_m \cdot (L_{d1} \cdot i_{d1} + \varphi_r) \quad (\text{III.2})$$

$$V_{d2} = R_s \cdot I_{d2} + L_{d2} \frac{di_{d2}}{dt} - W_m \cdot L_{q2} i_{q2} \quad (\text{III.3})$$

$$V_{q2} = R_s \cdot I_{q2} + L_{q2} \frac{di_{q2}}{dt} + W_m \cdot (L_{d2} \cdot i_{d2} + \varphi_r) \quad (\text{III.4})$$

Pour découpler l'évolution des courants i_{d1} , i_{q1} , i_{d2} , i_{q2} par rapport aux commandes, on va définir des termes de compensation F_{emd1} , F_{emq1} , F_{emd2} et F_{emq2} tel que :

$$V_{d1} = V'_{d1} - F_{emd1} \quad (\text{III.5})$$

$$V_{q1} = V'_{q1} - F_{emq1} \quad (\text{III.6})$$

$$V_{d2} = V'_{d2} - F_{emd2} \quad (\text{III.7})$$

$$V_{q2} = V'_{q2} - F_{emq2} \quad (\text{III.8})$$

$$V'_{d1} = R_s \cdot I_{d1} + L_{d1} \frac{di_{d1}}{dt} \quad (\text{III.9})$$

$$V'_{q1} = R_s \cdot I_{q1} + L_{q1} \frac{di_{q1}}{dt} \quad (\text{III.10})$$

$$V'_{d2} = R_s \cdot I_{d2} + L_{d2} \frac{di_{d2}}{dt} \quad (\text{III.11})$$

$$V'_{q2} = R_s \cdot I_{q2} + L_{q2} \frac{di_{q2}}{dt} \quad (\text{III.12})$$

$$F_{emq1} = W_m \cdot (L_{d1} \cdot i_{d1} + \varphi_r) \quad (\text{III.13})$$

$$F_{emd2} = W_m \cdot L_{q2} i_{q2} \quad (\text{III.14})$$

$$F_{emq2} = W_m \cdot (L_{d2} \cdot i_{d2} + \varphi_r) \quad (\text{III.15})$$

Les tensions V_{d1} et V_{q1} sont alors reconstitués à partir des tensions V'_{d1} et V'_{q1} et illustrés sur la figure (III.2).

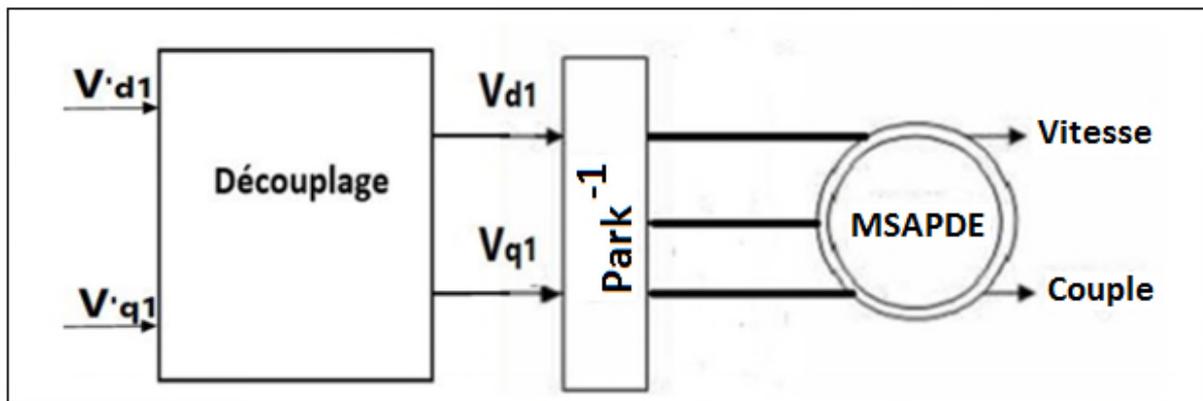


Figure III.2 : Illustration du découplage

III.2.2 Découplage par compensation

La compensation donc, a pour but de découpler les axes d et q. Ce découplage permet d'écrire les équations de la machine et de la partie régulation d'une manière simple et ainsi de calculer les coefficients des régulateurs

Le principe de ce découplage revient à définir deux nouvelles variables de commande F_{emd1} , F_{emq1} , F_{emd2} , F_{emq2} .

On a donc les courants i_{q1} , i_{q2} et i_{d2} ne dépend que de V_{d1} , V_{q1} , V_{d2} et V_{q2} . Ces expressions s'écrivent comme suit :

$$i_{d1} = V'_{d1}/R_s + \mathbf{p} \cdot L_{d1} \quad (\text{III.16})$$

$$i_{q1} = V'_{q1}/R_s + \mathbf{p} \cdot L_{q1} \quad (\text{III.17})$$

$$i_{d2} = V'_{d2}/R_s + \mathbf{p} \cdot L_{d2} \quad (\text{III.18})$$

$$i_{q2} = V'_{q2}/R_s + \mathbf{p} \cdot L_{q2} \quad (\text{III.19})$$

Le principe de correction (régulateur) consiste à réguler les courants statorique à partir des grandeurs de référence (désirées) par les régulateurs classiques PI. Le schéma de principe de régulation des courants statorique est représenté par la figure (III.3) :

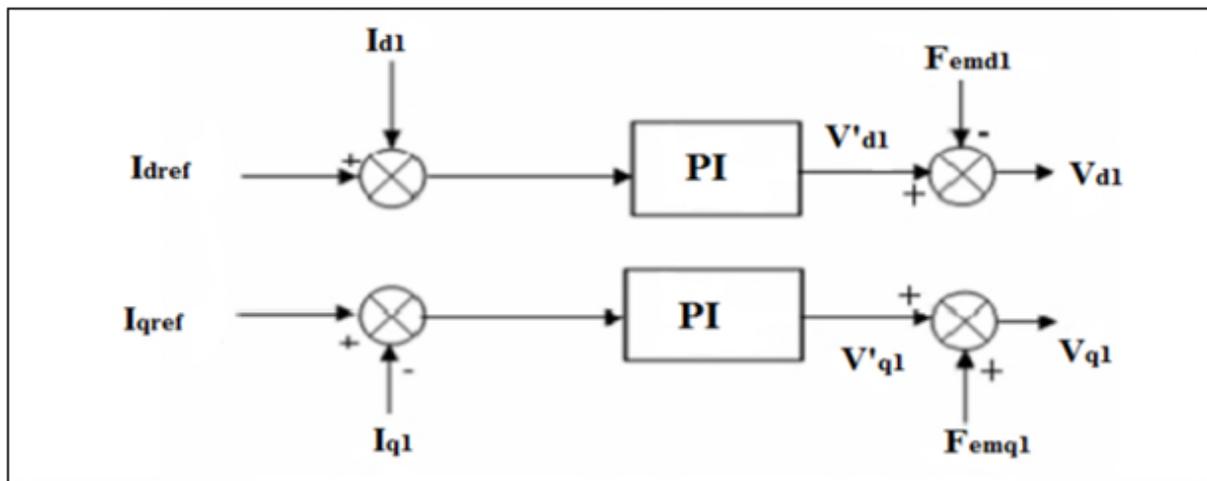


Figure III.3 : principe de régulation

Sur le schéma de principe précédent, V_{d1} et V_{q1} représente les tensions à la sortie des régulateurs des courants i_{d1} et i_{q1} .

III.2.3 régulateurs des courants

Les paramètres des régulateurs sont choisis de telle manière que le zéro introduit par chacun d'eux soit compensé par la dynamique du courant la figure III.4 illustre cette régulation.

On retrouve la même boucle de régulateur pour le courant i_{q1} . La dynamique du moteur relative à la partie électrique est égale à :

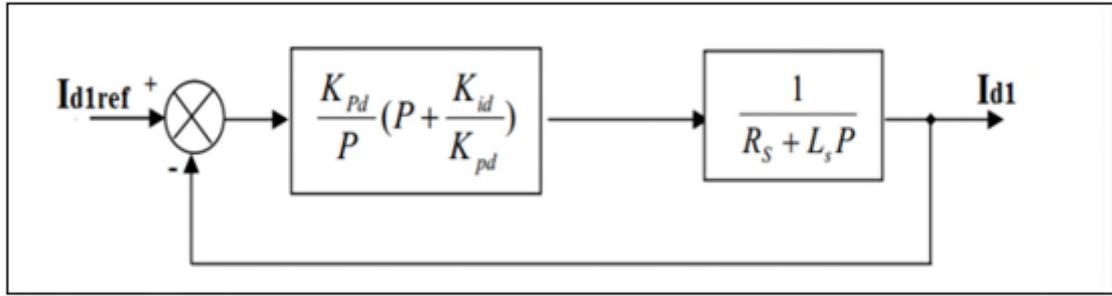


Figure III.4 : principe de régulation du courant i_{d1}

$$G_d(P) = \frac{1}{R_s + L_s P} = \frac{1}{R_s(1 + T_{d1}P)} \quad (\text{III.20})$$

Avec:

$$T_d = \frac{L_s}{R_s} \quad (\text{III.21})$$

T_d : Est la constante de temps électrique relative à l'axe direct. Cependant, pour déterminer les constantes du correcteur, on dégage la fonction de transfert en boucle ouverte : En plaçant le zéro du correcteur de façon à compenser le pôle du système en boucle ouverte,

c-à-dire :

$$\text{FTBO: } G_{od}(P) = \frac{K_{id}}{P} \left(1 + \frac{K_{pd}}{K_{id}}\right) \frac{1}{R_s(1 + T_d P)} \quad (\text{III.22})$$

$$T_{d1} = \frac{K_{pd}}{K_{id}} \quad (\text{III.23})$$

Ce qui ramène les fonctions de transfert des courants en boucle fermée aux expressions suivantes :

$$\text{FTBF} = \frac{\text{FTBO}}{1 + \text{FTBO}} \quad (\text{III.24})$$

$$G_{fd}(P) = \frac{I_d}{I_{ref}} = \frac{G_{od}}{1 + G_{od}} = \frac{1}{(1 + R_s/K_{id}P)} = \frac{1}{1 + \tau_d P} \quad (\text{III.25})$$

En choisissant ($\tau_d = T_d$), donc : $K_{id} = \frac{R_s}{T_s} = \frac{R_s^2}{L_s}$

III.2.4 Régulateur de vitesse

Le régulateur de vitesse permet de déterminer le couple de référence, afin de maintenir la vitesse correspondante. La dynamique de la vitesse est donnée par l'équation mécanique suivante :

$$\frac{Jd\Omega}{de} + f\Omega = c_e - c_r \rightarrow \Omega = \frac{c_e - c_r}{Jp + f} \quad (\text{III.26})$$

$$f=0 \rightarrow \Omega = \frac{c_e - c_r}{Jp}$$

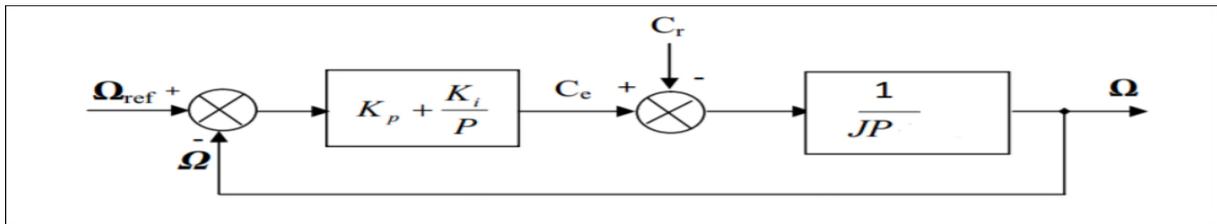


Figure III.5 : principe de régulation de vitesse

La fonction de transfert du régulateur de vitesse est donnée par :

$$PI(p) = K_p + \frac{K_i}{p} = \frac{K_p}{p} \left(p + \frac{K_i}{K_p} \right) \quad (\text{III.27})$$

La fonction de transfert du système précédent en boucle ouverte pour $C_r=0$ est donnée par :

$$FTBO_{\Omega} = \frac{K_p}{p} \left(p + \frac{K_i}{K_p} \right) \frac{1}{Jp} \quad (\text{III.28})$$

En adoptant la méthode de placement de pole, et la fonction de transfert de la vitesse en boucle fermée est donnée par :

$$FTBF_{\Omega} = \frac{\Omega}{\Omega_{ref}} = \frac{K_p \left(p + \frac{K_i}{K_p} \right)}{Jp^2 + pK_p + K_i} \quad (\text{III.29})$$

La $FTBF_{\Omega}$ possède une dynamique de 2^{ème} ordre, par identification à la forme canonique du 2^{ème} ordre dont l'équation caractéristique est représentée comme suit :

$$\frac{1}{\omega_0^2} P^2 + \left(\frac{2\xi}{\omega_0} \right) P + 1 = 0 \quad (\text{III.30})$$

$$\text{Alors : } \frac{J}{K_i} = \frac{1}{\omega_0^2}$$

$$\frac{K_p}{K_i} = \frac{2\xi}{\omega_0}$$

Avec : $K_i = J\omega_0^2$

Avec $K_p = \frac{2\xi K_i}{\omega_0}$

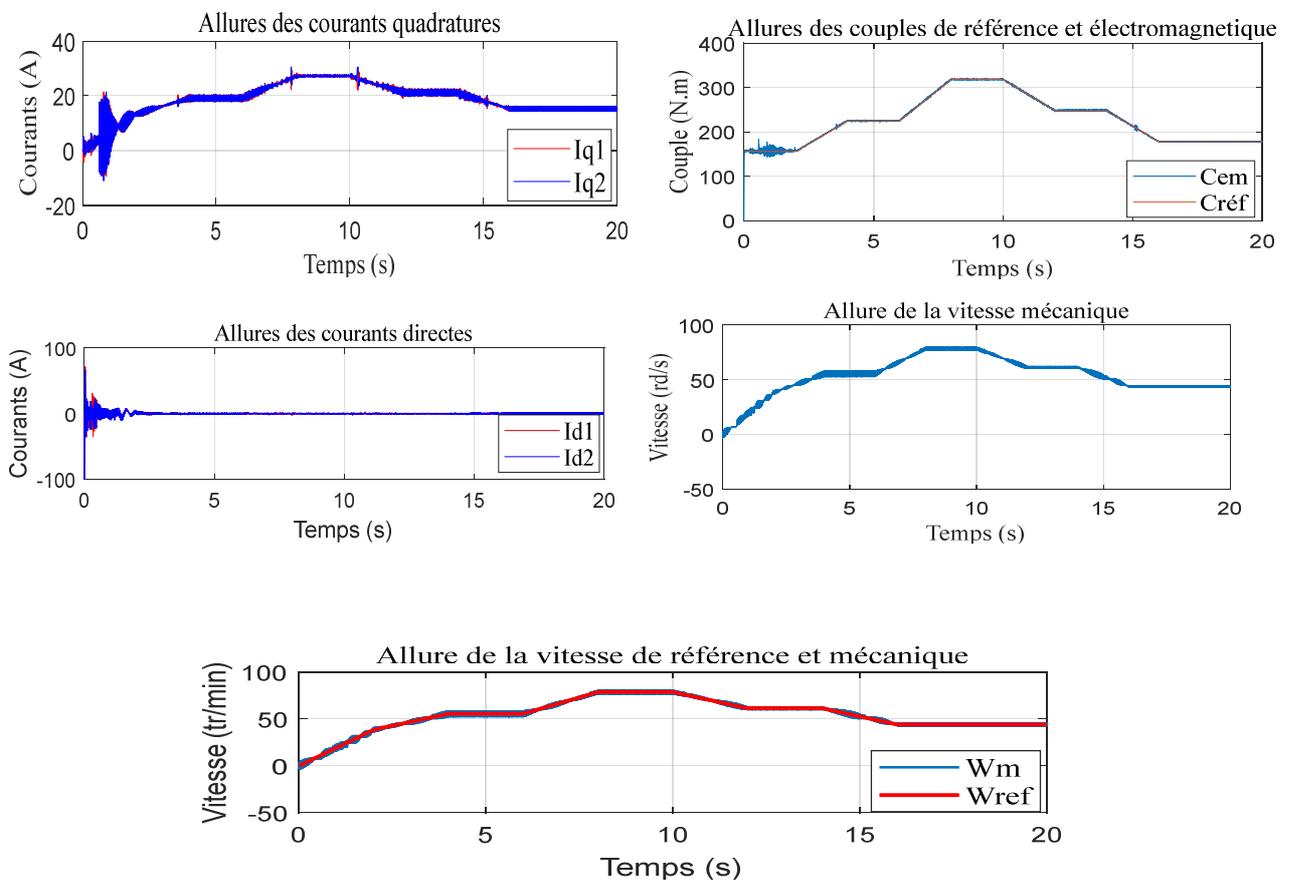
On obtient :

$$\begin{cases} 4J/\tau^2 \\ K_i \cdot \tau \end{cases} \quad (III.31)$$

$$\tau = \frac{L_s}{R_s}$$

III.3 Résultat de simulation et interprétation

Afin d'évaluer les performances de la commande vectorielle, à savoir le suivi d'une consigne et le rejet des perturbations, nous avons soumis notre système à un test de simulation sous Matlab simulink. Il faut noter que notre moteur doit faire avancer notre véhicule selon différents régimes, une accélération puis une stabilité puis une accélération à nouveau jusqu'à atteindre la vitesse maximal qui est de 110 km.h.



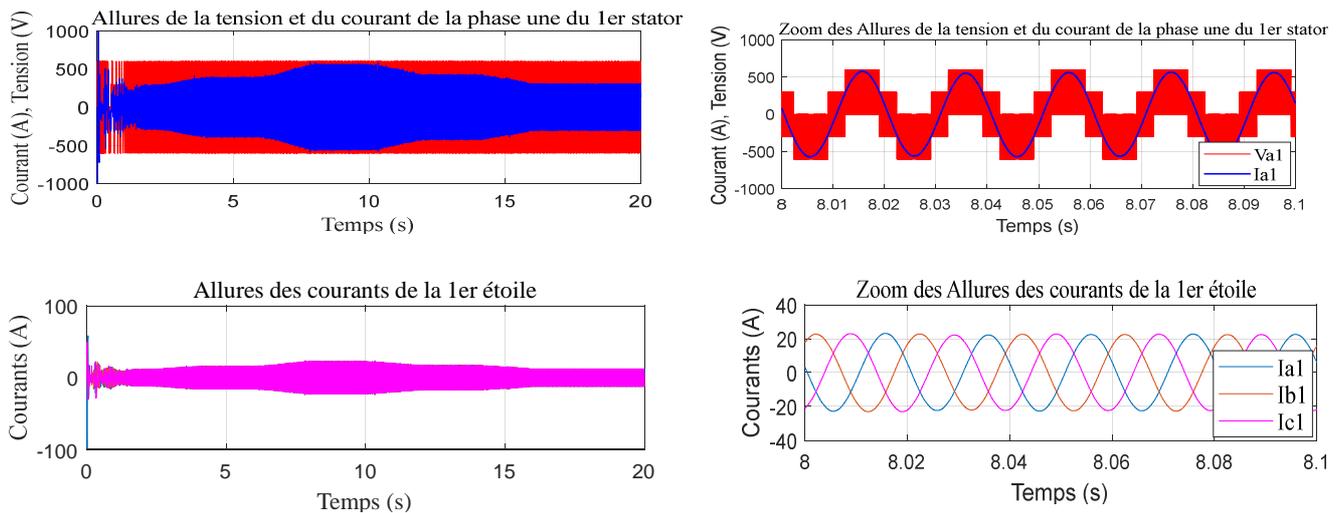


Figure III.6 : résultat de simulation de la commande vectorielle

L'allure de la vitesse montre la synchronisation entre la vitesse de rotation MSAPDE et celle de la référence, cette allure est l'image de la vitesse demandé par le véhicule pour un profil plat ou ($\alpha = 0\%$) On constate également que les courants quadratures ont la même image du couple. Ainsi le courant $I_d = 0$.

Les résultats de simulation montrent que le découplage est maintenu quel que soit la variation de référence, ou de la charge dans le régime permanent

Nous déduisons, que la régulation PI utilisé est bien paramétrée du fait qu'il donne des bonnes performances de poursuite et de rejet rapide de la perturbation de charge

III.4 Evolution des systèmes de stockage dans les véhicules électriques

Le développement des véhicules électriques dépend directement de celui des systèmes de stockage embarqués. Le vrai challenge s'articule autour de l'équilibre entre coût et performance de ces systèmes. Mais aussi leurs performances vis-à-vis l'autonomie, pour cela ont fait appel à l'hybridation des sources de stockage d'énergie dans le but d'une meilleur optimisation. [47]

III.4.1 Batteries Lithium-ion

A. Paramètres caractéristiques

➤ Capacité

La capacité d'une batterie définit la quantité de charge électrique restituable suite à une charge complète. Cette capacité est exprimée en ampères-heures (Ah), et définit également l'intensité du courant de décharge complet en une heure.

➤ **Résistance interne**

La résistance interne d'une batterie représente la somme de la résistance électrique de ces éléments. Le type d'électrodes, leurs connexions, la composition chimique de l'électrolyte et les réactions électrochimiques sont les facteurs influant cette résistance interne [48].

➤ **Tension (OCV)**

La tension à vide ou en circuit ouvert (Open Circuit Voltage : OCV) représente le potentiel d'équilibre. Elle correspond à la tension continue d'une batterie sans sollicitation de courant de charge ou de décharge [48].

➤ **Etat de charge (SOC)**

L'état de charge ou SOC « State of Charge » d'une batterie décrit la quantité résiduelle de charge par rapport à la quantité de charge admissible de la batterie. Le SOC est exprimé en pourcentage. Une valeur de 100% correspond à un état de charge complet de la batterie et pour la valeur de 0% la batterie est complètement déchargée.

➤ **Etat de santé (SOH)**

L'état de santé SoH « State of Health » de la batterie décrit la réduction de ses performances afin de définir l'état de son vieillissement. Le vieillissement se traduit par la dégradation de ses paramètres caractéristiques. Cette dégradation correspond à une diminution de sa capacité et/ou à l'augmentation de sa résistance interne. Une valeur de 100% du SOH correspond à un état neuf (100% de la capacité initiale) et la valeur 0% indique que la fin de vie de la batterie est atteinte (80% de la capacité initiale) [49].

➤ **Système de gestion intégré (BMS - Battery Management System)**

Pour des raisons de sécurité, des outils de gestion interne contrôlent l'état de la batterie. Les batteries lithium-ion disposent d'un « Battery Management System » (BMS) intégré qui protège entre autres la batterie contre les décharges profondes, les surcharges ou la surchauffe. Le BMS empêche la batterie de fonctionner en dehors de sa plage de fonctionnement typique. La surveillance des états de la batterie met fin à son utilisation en cas de besoin. Techniquement, le BMS peut contenir également une unité de traitement qui intègre des algorithmes sophistiqués afin de rendre la batterie communicante et permettre de diagnostiquer ses états de charge et de santé en permanence [49].

Le BMS intègre également une fonction d'équilibrage des états de charge entre les cellules de la batterie. Le niveau de tension de chaque cellule est mesuré individuellement afin de les ramener à une utilisation avec des niveaux équilibrés de tension. Il existe deux techniques d'équilibrage :

➤ **L'équilibrage dissipatif**

Le principe se base sur l'évacuation de l'énergie de la cellule (dissipation par effet joule) qui a atteint sa fin de charge. La dissipation d'énergie se fait à travers une résistance, via un interrupteur électronique en série, ce qui permet aux autres cellules internes de la batterie d'atteindre le même état de charge et de s'équilibrer entre elles. [49]

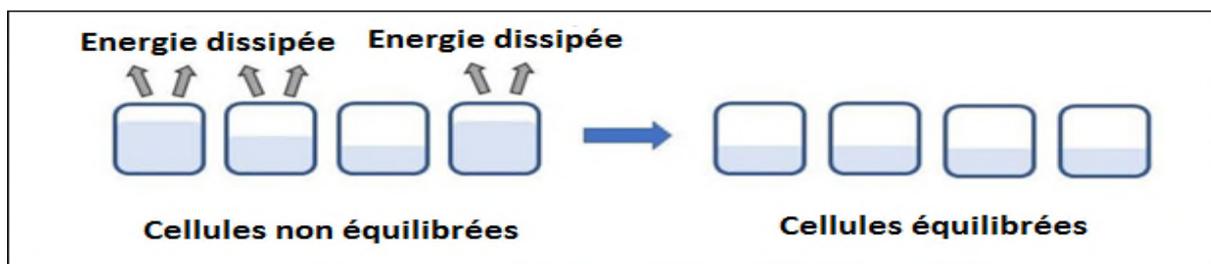


Figure III.7 : Principe d'équilibrage dissipatifs [49]

➤ **Equilibrage redistributif :**

Le principe est d'acheminer l'énergie des cellules les plus chargées vers les moins chargées. Contrairement, à l'équilibrage dissipatif, il n'y a pas de dissipation d'énergie mais l'énergie est redistribuée entre les cellules.

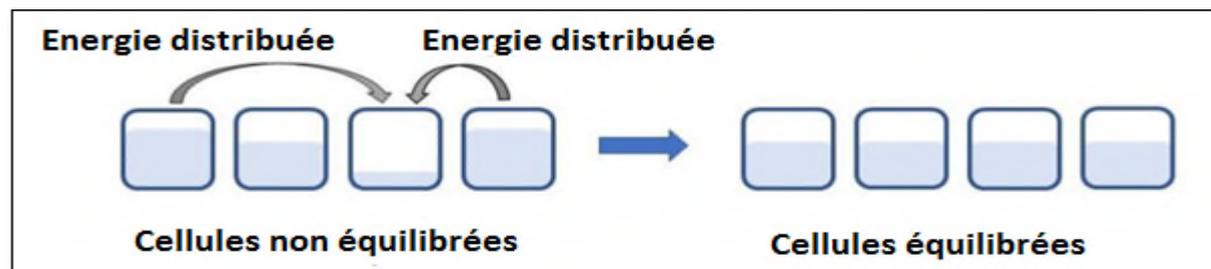


Figure III.8 : Principe d'équilibrage redistributif [49]

III.4.2 Problématiques liées aux batteries

A. Autonomie

L'autonomie d'un dispositif de stockage de l'énergie électrique est essentiellement liée à sa puissance admissible (en W) et à son énergie disponible (en Wh). Le diagramme de Ragone est souvent utilisé pour comparer les particularités des différents éléments de

stockage de l'énergie. Comme nous l'observons sur la (Figure.III.9), les piles à combustible ont une faible puissance massique mais « une énergie massique » assez importante. Les supercondensateurs possèdent une puissance massique importante mais une énergie massique plutôt faible. Les batteries se placent entre ces deux composants [50].

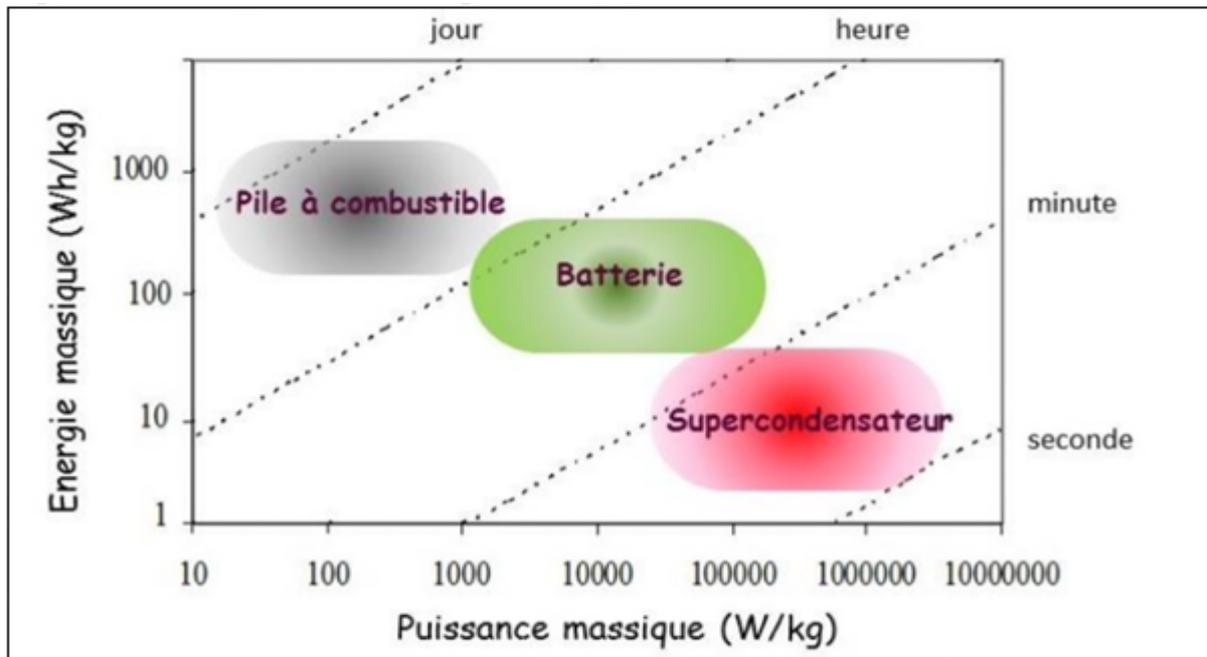


Figure III.9 : Diagramme de Ragone. [62]

B. Durée de recharge

La durée de recharge des batteries est liée principalement à leur énergie spécifique. Ce temps de recharge dépend du mode de recharge qui se caractérise entre autres par l'intensité du courant appliqué. En fait, plus le courant est faible plus la durée de recharge est longue. Cependant, des recharges rapides peuvent affecter leur durée de vie. De plus, elles peuvent aussi perturber le réseau électrique dans le cas de recharges simultanées d'un très grand nombre de véhicules. Nous pouvons distinguer trois modes de recharge des batteries pour les véhicules électriques. [51]

- 1- Mode de recharge sur prise domestique
- 2- Mode de recharge sur borne de recharge
- 3- Le mode de recharge rapide

C. Sûreté de fonctionnement

➤ Vieillessement des batteries lithium-ion

Le vieillissement d'une batterie engendre une perte de ses performances. Une batterie s'use selon deux modes : soit lorsque l'on ne s'en sert pas, c'est le vieillissement calendaire, soit lors de son usage appelé vieillissement par cyclage. Les mécanismes de vieillissement sont liés à la constitution physique de la batterie. Ceux-ci peuvent prendre naissance à l'électrode négative ou à l'électrode positive.

Concernant l'électrode négative des batteries lithium-ion, c'est souvent le carbone qui est utilisé sous forme graphite. Une interface protectrice entre l'électrode et l'électrolyte appelée Solid Electrolyte Interface ou Interphase (SEI) est présente. La dégradation ou la croissance de cette couche représente une des causes principales du vieillissement. En fait, cette couche SEI est le résultat de l'oxydation de l'électrode carbonée lors de la première charge. La SEI permet de protéger l'électrode négative. Néanmoins, ce processus n'est pas idéal puisqu'il engendre la consommation d'une partie du lithium. Ce processus évolue tout au long de l'exploitation de la batterie (en cyclage et en repos). La formation de la SEI dépend du régime des premières charges, de la température ainsi que de l'électrolyte utilisé.

La dissolution du matériau actif de l'électrode positive favorise aussi les phénomènes de vieillissement des batteries. Au niveau de l'électrode positive, la perte de la matière active l'oxydation de l'électrolyte, la formation d'une couche en surface ou la production de gaz sont des causes de dégradation. La vitesse de dégradation est liée principalement à sa température, aux régimes de courant appliqués (charge/décharge) et aux états de charge de la batterie.

Comme visible sur la (Figure.III.10) le vieillissement des batteries engendre notamment la diminution de la capacité (en Ah) soit de l'autonomie du véhicule. [51]

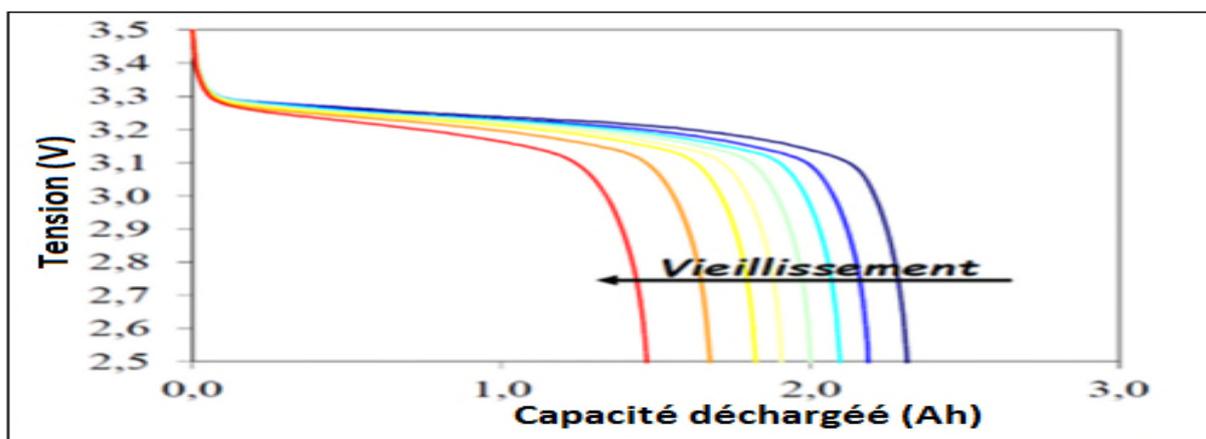


Figure III.10 : Dégradation des performances d'une batterie lors du vieillissement [51].

III.5 L'hybridation dans les stockeurs

III.5.1 Pourquoi l'hybridation ?

Un système de stockage hybride associe plusieurs technologies de stockage dans le but d'exploiter au mieux les avantages de chacune. Notre étude se limite à l'association de deux technologies différentes.

Pour réaliser cette hybridation, il est nécessaire de combiner un stockage haute Puissance noté HP capable d'émettre et recevoir de fortes puissances à un stockage haute Énergie noté HE dont la capacité énergétique est importante.

La (Figure III.11) illustre un exemple de répartition des puissances entre les deux systèmes de stockage HE et HP suivant les besoins énergétiques du VE [52].

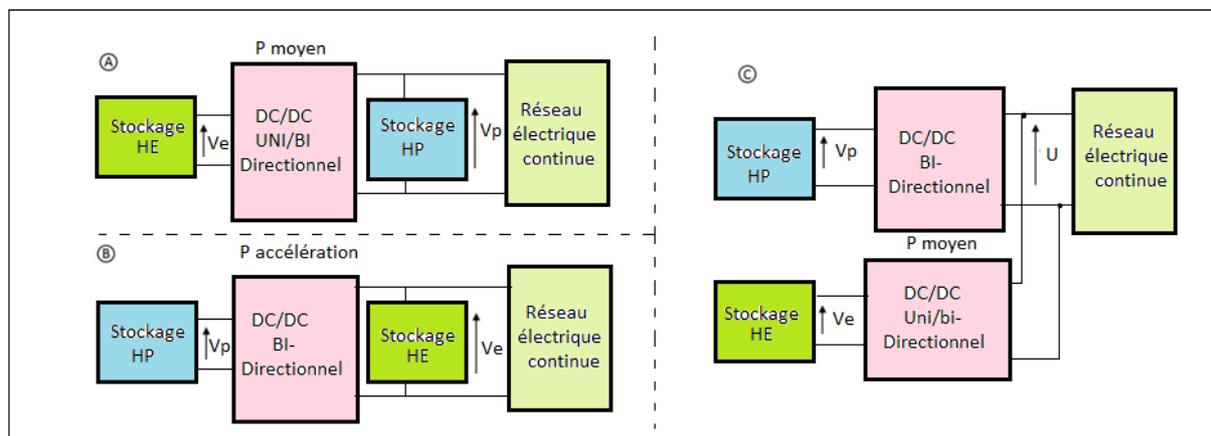


Figure III.11 : Différentes architecture d'hybridation des sources [52].

III.5.2 Énergie Vs Puissance : batterie ou super condensateur ?

Il est difficile de préconiser l'emploi de batterie ou de supercondensateur, les deux technologies ayant des caractéristiques très différentes. Certains auteurs privilégient l'emploi des supercondensateurs en raison de leur efficacité énergétique et de leur puissance spécifique, mais leur faible capacité peut être un handicap.

A l'inverse, les batteries sont capables de stocker une grande quantité d'énergie mais sont pénalisées par leur puissance spécifique. Une solution consiste à coupler batteries et supercondensateurs pour cumuler leurs avantages (puissance et énergie) mais ceci augmente inévitablement la complexité et le coût.

III.5.3 Principe d'hybridation des sources d'énergie

La densité énergétique et la densité de puissance sont des critères principaux pour choisir le système de stockage d'un véhicule électrique [53].

Pour une application comme le véhicule électrique utilisant une seule source d'énergie (solution mono-source), cela pose problème. On est en général amené à sur-dimensionner le dispositif de stockage, ou à limiter les performances en transitoire, ce qui impose de faire des compromis au niveau du volume et de la masse.

Une solution alternative est d'associer deux sources entre elles : la première de forte densité d'énergie et la seconde de forte densité de puissance afin de permettre de combler une partie du vide laissé dans le diagramme de *Ragone*. On synthétise ainsi un nouveau système de stockage, dit « hybride » [54].

Cette solution d'hybridation des sources permet d'exploiter les performances de deux systèmes de stockage et donne des degrés de liberté lors de la conception de ce stockeur [37]. On peut ainsi avoir pour objectif de maîtriser différents critères comme le volume, la masse, le coût d'investissement ou d'utilisation, ou encore sa durée de vie [65]. Le principe d'hybridation des sources de stockage est illustré par la (Figure.III.12). Il est formé de deux sources et d'un système de gestion réalisé à base de convertisseurs d'électronique de puissance permettant de gérer les flux de puissance entre les deux sources.

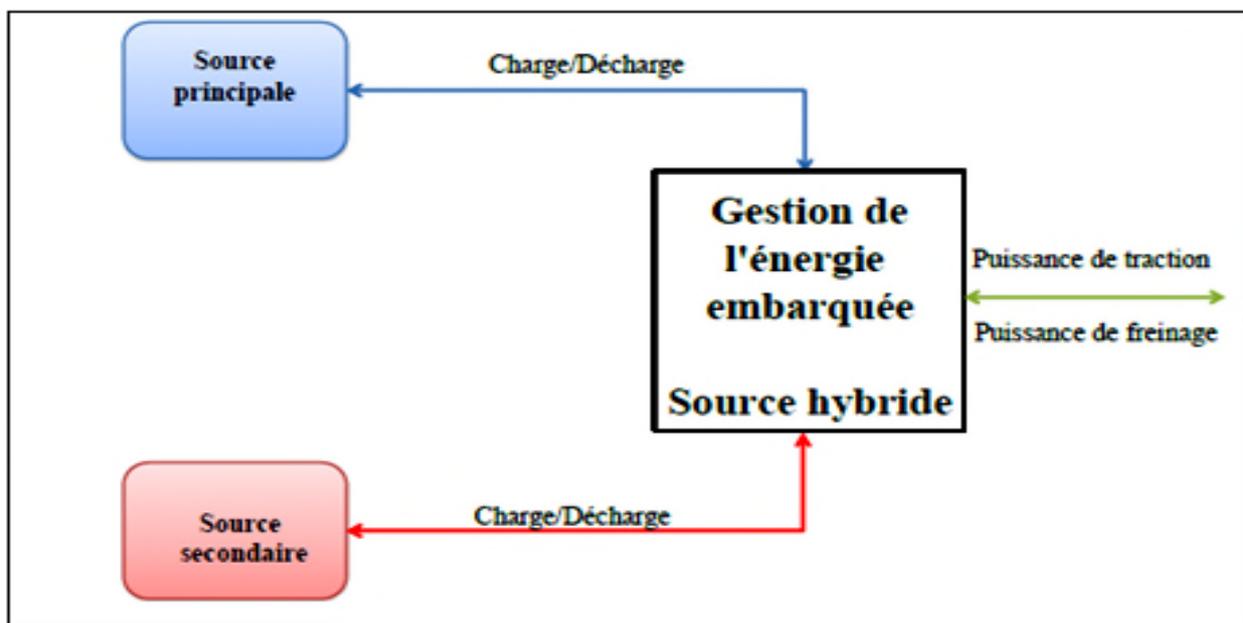


Figure. III.12 : Principe d'hybridation des sources de stockage hybrides. [54]

III.6 Modèle énergétique du stockage d'énergie par batterie HE

Une batterie est composée d'un assemblage de N_{batt} cellules supposées de caractéristiques identiques. La batterie contient plusieurs modules dans lesquels les cellules sont connectées en série afin d'augmenter la tension en sortie de batterie. Puis les modules sont connectés en parallèle afin d'augmenter le courant maximal disponible en sortie de batterie. De ce fait, la tension du pack de batterie est la somme des tensions de toutes les cellules composant le pack comme montré sur la (figure III.13) La batterie contient donc $N_{batt} = N_s \times N_p$ cellules, où N_p est le nombre de modules connecté en parallèle et N_s est le nombre de cellules connecté en série dans chaque module.

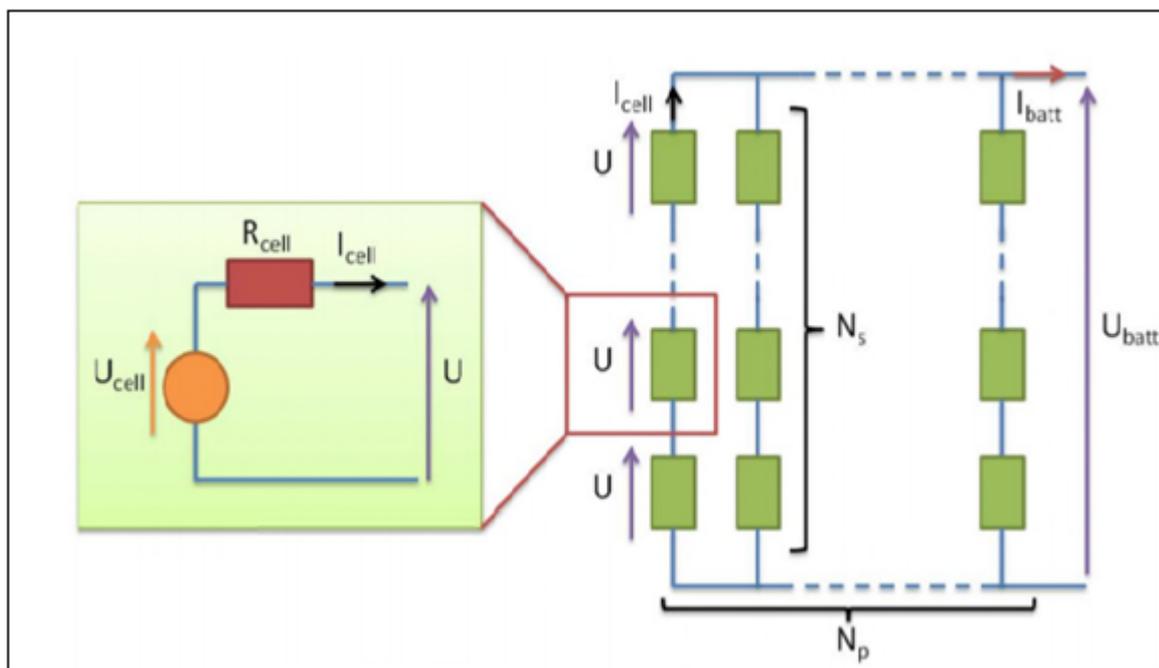


Figure III.13 : Architecture du pack batteries (série/parallèle) [54].

Afin de disposer d'un modèle énergétique simplifié, chaque cellule est modélisée sous la forme d'un dipôle équivalent comportant une source de tension continue appelée tension à vide notée U_{cell} [V] et un conducteur ohmique appelé résistance interne noté R_{cell} [Ω]. Les dynamiques liées aux réactions électrochimiques ne sont pas prises en compte. Dans les conditions réelles de fonctionnement, la tension à vide et la résistance interne dépendent des conditions d'utilisation telles que l'état de charge (SOC), la température θ_{cell} et le sens du courant $I_{cell}(t)$.

L'hypothèse majeure est de considérer que toutes les cellules ont des caractéristiques identiques et fonctionnent dans les mêmes conditions opérationnelles (température constante, courant de cellule identique). La batterie dispose d'un système de gestion de l'état des cellules appelé BMS (Battery Management System). Il permet d'assurer un équilibre des tensions entre cellules via un circuit d'équilibrage. Comme les cellules sont supposées identiques, on supposera donc que leurs caractéristiques évolueront de façon similaire. Le modèle global de la batterie peut alors être ramené à une cellule équivalente. Dans la réalité, les cellules ont des caractéristiques très proches mais elles ne vieillissent pas de manière similaire. Ainsi, la résistance interne R_{cell} et la tension à vide U_{cell} ne dépendent plus que du SOC et du sens du courant.

Le SOC (State of Charge) représente l'état de charge de la cellule, c'est-à-dire la quantité d'énergie contenue dans la cellule. L'état de charge est décrit par l'équation dynamique suivante:

$$\frac{dsoc}{dt} = \frac{-I_{cell}(t)}{Q_{cell}} \quad (III.32)$$

Où I_{cell} [A] représente le courant débité au travers de la cellule et Q_{cell} [A.s] la capacité nominale de la cellule. Le courant de la cellule est calculé à partir de la puissance de la batterie P_{batt} , du nombre de cellules N_{batt} , de la résistance ohmique R_{cell} et de la tension à vide U_{cell} . (L'équation bbh) permet de calculer I_{cell} à partir de tous ces paramètres pour chaque instant du cycle étudié.

$$I_{cell}(t) = \frac{1}{2 \cdot R_{cell}(soc)} \left(U_{cell}(soc) - \sqrt{U_{cell}(soc)^2 - \frac{4 \cdot R_{cell}(soc) \cdot P_{batt}(t)}{N_{batt}}} \right) \quad (III.33)$$

Pour des raisons techniques liées à l'échauffement du composant, le courant traversant la cellule est limité à chaque instant t entre I_{cell}^{min} et I_{cell}^{max} par la relation suivante :

$$I_{cell}^{min} \leq I_{cell}(t) \leq I_{cell}^{max} \quad (III.34)$$

La figure III.15 présente l'évolution de la tension à vide U_{cell} en fonction de l'état de charge pour une cellule

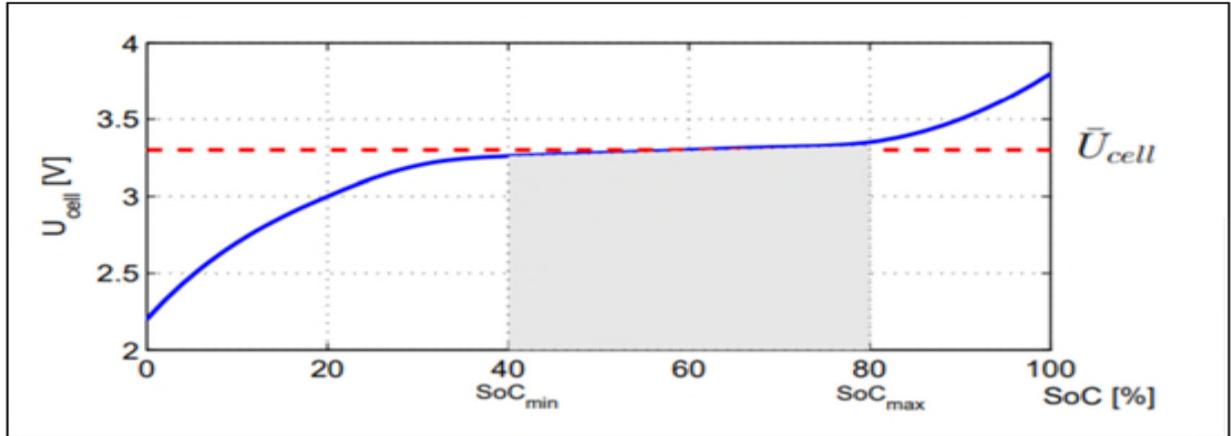


Figure III.14 : Evolution de la tension à vide en fonction du SOC pour une cellule. [54]

Si la plage d'utilisation du SOC est restreinte entre 40 et 80 %, alors on peut considérer que la tension à vide est quasi constante. De ce fait, on utilisera l'approximation suivante :

$$U_{cell} = \bar{U}_{cell}$$

L'hypothèse est également valable pour la valeur de la résistance interne. On suppose qu'est R_{cell} est quasi constante sur la plage de SOC étudiée. Le calcul du courant de cellule est alors simplifié et dépend principalement du dimensionnement N_{batt} et de la puissance fournie par la batterie P_{batt}

$$I_{cell}(t) = \frac{1}{2 \cdot R_{cell}} \left(U_{cell} - \sqrt{\bar{U}_{cell}^2 - \frac{4 \cdot R_{cell} \cdot P_{batt}(t)}{N_{batt}}} \right) \quad (III.35)$$

Enfin, l'énergie totale stockable E^0_{cell} [J] dans une cellule est définie par la relation suivante :

$$E^0_{cell} = Q_{cell} \cdot \bar{U}_{cell} \cdot 3600 \quad (III.36)$$

III.6.1 Assemblage de la batterie en module, en pack

Dans les véhicules électriques, le système de stockage d'énergie (SSE) est constitué d'un pack de batterie généralement haute tension (quelques centaines de V). Le pack batterie est formé de plusieurs modules à leur tour formés de plusieurs cellules unitaires connectées en série ou en parallèle selon que l'on veut avoir, respectivement, plus de puissance ou plus d'énergie. La cellule ou élément constitue donc la base d'un SSE et est le plus petit format qu'une batterie peut prendre.

La mise en série de cellules permet d'obtenir plus d'énergie embarquée en ajoutant les tensions. De son côté, la mise en parallèle permet d'avoir plus de capacité grâce à la

sommation des courants de chaque cellule. Ce dernier assemblage permet la division de L'impédance totale par le nombre de branches en parallèle, comparée au cumul des effets résistifs dans l'assemblage en série. Cependant, d'une part, la mise en série des cellules peut provoquer des déséquilibres de charge à cause des différences de température entre cellules. D'autre part, la mise en parallèle peut être très dangereuse en cas de court-circuit de cellule où est en le module encourt le risque d'incendie. Quel que soit le type d'assemblage, pour se prémunir des problèmes tels que les surtensions en décharge et en charge, des circuits électriques de protection sont nécessaires pour contrôler le fonctionnement du SSE

III.6.2 Critères énergétiques et dimensionnement

- **Dimensionnement de la source de puissance**

Le dimensionnement des sources de puissance à un impact essentiel à la fois sur les performances dynamiques du véhicule (agrément de conduite).

Il est évidemment fonction d'un cahier des charges lié à l'application. Les solutions obtenues pour ce cahier des charges peuvent être nombreuses et variées (choix de la source secondaire par exemple). Dans ce cas, pour effectuer un choix, il faut être sûr de disposer d'une stratégie de commande qui exploite au mieux les échanges énergétiques. Le choix des composants et la stratégie de commande sont donc intimement liés pour le dimensionnement.

Le dimensionnement doit tenir compte de plusieurs aspects :

- **Situations de conduite:**

- **Cas de la vitesse constante du véhicule:**

Le véhicule doit pouvoir rouler à une vitesse constante V_{const} pendant une durée prolongée (typiquement sur autoroute pendant plusieurs dizaines de minutes), ce qui équivaut à une demande de puissance constante $P_{vitesse_const}$ de la motorisation. La source de puissance secondaire ayant une quantité d'énergie limitée, elle ne peut assurer une assistance en puissance prolongée au système lithium-ion. Le système lithium-ion doit donc avoir une puissance maximale P_{max} suffisante pour assurer le maintien en vitesse du véhicule.

- **cas des accélérations du véhicule :**

Les accélérations du véhicule se caractérisent par des pointes de puissance P_{accel} de durée limitée de la motorisation (quelques secondes). Le système lithium-ion n'est pas toujours en mesure d'assurer seul les accélérations du véhicule soit parce que sa dynamique est limitée, soit parce que sa puissance maximale P_{max} est limitée. La puissance manquante $P_{accel} - P_{max}$ est alors fournie par la source secondaire d'énergie.

➤ **Problème de la masse du véhicule**

La consommation d'énergie est influencée par la masse du véhicule. La masse de la source de puissance (système batteries + source secondaire d'énergie) est donc un facteur important dans le processus de dimensionnement. A la limite, le surpoids introduit peut aller jusqu'à annuler les bénéfices obtenus grâce à la source secondaire. Du fait du poids supplémentaire introduit par la source secondaire d'énergie ainsi que l'augmentation de la complexité du moteur électrique.

III.6.3 Dimensionnements des supercondensateurs

Dans cette partie, nous allons présenter le dimensionnement des supercondensateurs pour le véhicule électrique. Ce dimensionnement consiste à calculer la valeur de la capacité qui est capable de fournir l'énergie pour démarrer le véhicule et qui, dans le même temps, pourrait stocker toute l'énergie cinétique du véhicule récupérable lors de freinages ou de décélérations. Pour cela on effectue deux calculs, le premier consiste à fixer un cahier des charges dans lequel on définit la puissance à fournir ou à récupérer, la tension maximale et le temps de fonctionnement des supercondensateurs ; le deuxième calcul consiste à utiliser un profil de vitesse normalisé à partir duquel on définit l'énergie qu'il faut pour propulser le véhicule et celle que l'on peut récupérer. Que ça soit le premier ou le deuxième calcul, le schéma de calcul de la capacité reste le même.

III.6.4 Méthode de dimensionnement des supercondensateurs

C'est la méthode qui consiste à calculer les paramètres des supercondensateurs (capacité, courant, nombre d'éléments en série N_s , nombre d'éléments en parallèle N_p , énergie des supercondensateurs, temps de charge ou de décharge, tension des supercondensateurs.

A-Rendement

Toute l'énergie ou puissance produite par les supercondensateurs n'est pas intégralement transmise aux moteurs et de même, toute l'énergie ou puissance récupérable du véhicule n'est pas intégralement stockée dans les supercondensateurs. En effet, avant que l'énergie ne parvienne aux moteurs (dans le cas de la traction) ou avant qu'elle n'arrive dans les supercondensateurs (dans le cas de la récupération) elle doit faire le chemin suivant :

supercondensateurs \Leftrightarrow hacheur \Leftrightarrow onduleur \Leftrightarrow moteur

On note :

- η_T : le rendement de la conversion en traction ;
- η_R : le rendement de la conversion en récupération ;
- η_{HACH} : le rendement du hacheur ;
- η_{OND} : le rendement de l'onduleur ;
- η_{MR} : le rendement du moteur roue. Le rendement global en traction ou en récupération est alors le même, mais les rendements des composants sont susceptibles de varier en fonction des puissances transitées :

$$\eta_T = \eta_{HACH} \times \eta_{OND} \times \eta_{MR}$$

$$\eta_R = \eta_{HACH} \times \eta_{OND} \times \eta_{MR}$$

B- Cahier de charge

Pour notre cas les supercondensateurs ont deux fonctions:

- Fournir de la puissance au moteur ;
- Récupérer de l'énergie lors des freinages.

Pour chacune des fonctions, le cahier de charge diffère, il convient de faire un compromis sur le choix des supercondensateurs pour que les deux cahiers de charge soient respectés. Le cahier des charges détermine :

- La puissance et l'énergie maximale à fournir ou récupérer ;
- La tension des supercondensateurs ;
- La durée pendant laquelle on fournit de l'énergie ou on en récupère.

C-Quand il faut fournir de la puissance ou de l'énergie ?

Les supercondensateurs fournissent de la puissance au moteur pendant un temps bref, de l'ordre de 10s, la puissance à fournir au moteur est de 50 kw. Ce niveau de puissance a été déterminé par des simulations de dynamique du véhicule, pour un démarrage typique du véhicule. La tension maximale des supercondensateurs est celle du bus continu du véhicule c'est-à-dire 500V. En résumé, pour ce mode de fonctionnement, le cahier des charges est :

$$P_{max} = 50 \text{ kw}$$

$$U_{max} = 500V$$

$$\Delta T = 10\text{s}$$

$$E_{max} = 500 \text{ kJ}$$

Pour la détermination du rendement global nous avons considéré que le rendement du hacheur est de 0,98 celui de l'onduleur est de 0,97 et celui des moteurs de 0,98 ce qui donne un rendement global de 0,97. Ces rendements ont été évalués par rapport aux études des différents organes qui étaient en cours. La puissance réelle à fournir est :

$$P_{maxreel} = \frac{P_{max}}{\eta_T} = \frac{50000}{0.97} = 51546.4 \text{ w} \quad (\text{III.37})$$

Pour une durée de 10 s, l'énergie serait de 51546.4 J

➤ Calcul des paramètres

Connaissant la puissance P_{max} ou l'énergie E_{max} à fournir au moteur, le temps Δt pendant lequel on fournit cette puissance et la tension du bus E_{max} , on calcule les paramètres suivants des supercondensateurs :

○ Calcul de l'énergie d'une cellule

$$E_{sc}(cellule) = \frac{1}{2} \cdot C_{sc} \cdot V^2 \quad (\text{III.38})$$

$$E_{sc}(cellule) = \frac{1}{2} \cdot 310 \cdot 2.7^2 = 1129.95 \text{ j} = 0.31 \text{ w.h} = 0.00031 \text{ kw.h}$$

Sachant qu'on doit tenir compte de la profondeur de décharge

○ Calcul de l'énergie du pack supercondensateur

On suppose que le pack occupe une énergie de 10% par rapport à la source principale ce qui correspond à un temps de fonctionnement de la source principale

(La source principale a une énergie de 50 kw.h)

Donc

$$E_{sc}(pack) = 0.13889 \text{ kw.h}$$

Sachant qu'on doit tenir compte de la profondeur de décharge

$$E_{sc(\max)}(pack) = \frac{1}{0.9} E_{sc}(pack) \quad (\text{III.39})$$

$$E_{sc(\max)}(pack) = \frac{1}{0.9} \cdot 0.13889 \text{ kw.h}$$

$$E_{sc(\max)}(pack) = 0.15432 \text{ kw.h}$$

$$E_{sc} = P_{max} \cdot T$$

D'où

$$T = \frac{E_{sc}}{P_{max}} = \frac{0.13889}{50} = 2,7 \cdot 10^{-3} \text{ h} \quad (\text{III.40})$$

$2,7 \cdot 10^{-3} \text{ h}$ correspond à 10 seconde c'est le temps de fonctionnement des supercondensateur avant la décharge complète

➤ **calcul de nombre de cellules a utilisé**

$$N_S \cdot N_P = \frac{E_{sc(\max)}(pack)}{E_{sc}(cellule)} \quad (\text{III.41})$$

$$N_S \cdot N_P = \frac{0.15432}{0.00031}$$

$$N_S \cdot N_P = 498 \text{ cellules}$$

➤ **nombre de cellules en série**

$$N_S = \frac{199.8}{2.7} = 74 \text{ cellules}$$

○ **nombre de série en parallèle**

$$74 \times N_P = 498 \quad (\text{III.42})$$

$$N_P = \frac{498}{74}$$

$$N_P = 7 \text{ cellules}$$

III.6.5 Quand il faut récupérer de l'énergie cinétique

La récupération d'énergie dans les supercondensateurs se fait lors des décélérations et des freinages du véhicule. Le temps de freinage est estimé pour notre application à 10

secondes et l'énergie cinétique du véhicule est calculée à la vitesse maximale de 110 km.h pour une masse totale du véhicule de 1500 kg.

○ **Calcul de l'énergie cinétique récupérable sur le véhicule**

A partir de l'énergie cinétique du véhicule et du temps de freinage, on calcule l'énergie maximale que l'on peut récupérer :

$$E_{cmax} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot V^2 \quad (\text{III.43})$$

$$E_{cmax} = 0.5 \cdot 1500 \cdot 110^2$$

$$E_{cmax} = 9075000 \text{ j} = 9075 \text{ KJ} = 2.52 \text{ kw.h}$$

Ce calcul se fait à partir de la vitesse maximale du véhicule et de la masse maximale en charge. Compte tenu des pertes dues aux forces de résistances du véhicule et des

Convertisseurs électriques (moteurs et électronique de puissance), il n'est pas possible de récupérer toute l'énergie. On estime que l'énergie récupérable est de 30% de l'énergie cinétique maximale. [42]

$$E_{recup} = 0.30 \times 9075 \quad (\text{III.44})$$

$$E_{recup} = 3672 \text{ KJ}$$

Donc

$$E_{recup} = 1.02 \text{ kw}$$

III.7 Dimensionnements des batteries

Ce dimensionnement se base sur l'autonomie désiré de l'énergie du pack, plus on a d'énergie plus on peut rouler plus loin. [55] [43]

• **Energie de la batterie**

$$C_{batt} = 30 \text{ Ah}$$

$$V_{batt} = 12.8 \text{ (4 cellules en série de 3.2V)}$$

$$E_{batt} = C_{batt} \times V_{batt}$$

$$E_{batt} = 30 \times 12.8$$

$$E_{batt} = 384 \text{ W}$$

Pour notre étude on a choisi une autonomie de 160 km ce qui nous oblige d'avoir une énergie de 24.567 kw.h à la source d'alimentation.

- **Le nombre de batterie nécessaire**

$$N_{bat} = \frac{E_T}{E_{bat}} \quad (\text{III.45})$$

$$N_{bat} = \frac{24567}{384}$$

$$N_{bat} = 64 \text{ Batteries}$$

- **Nombre de batteries en série**

Le choix de la tension d'entrée de la batterie qui déterminera la valeur le nombre de batterie à mettre en série, pour notre étude on a choisi un nombre batteries de type naturel

$$N_{bs} = \frac{V_{batpack}}{V_{bat}} \quad (\text{III.46})$$

$$N_{bs} = \frac{204.8}{12.8}$$

$$N_{bs} = 16 \text{ batteries}$$

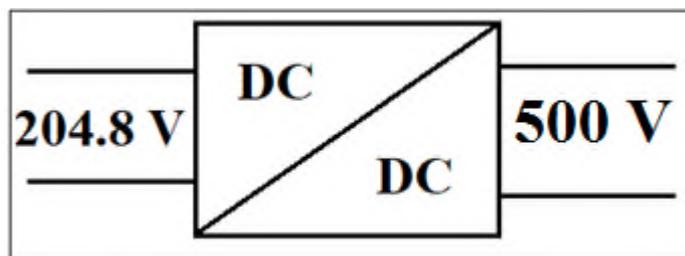


Figure III.15 : convertisseur DC/DC.

- **Nombre de cellules en parallèle**

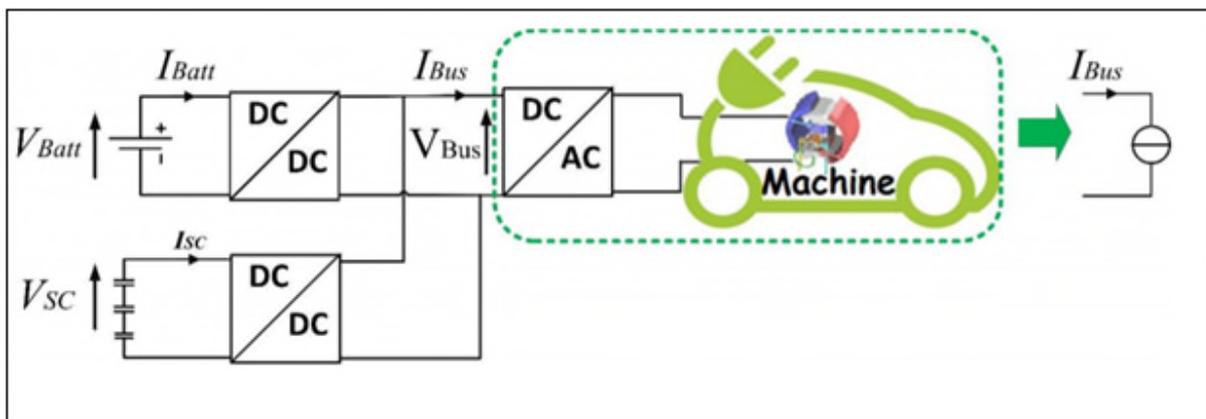
$$N_{bp} = \frac{N_{bat}}{N_{bs}}$$

$$N_{bp} = \frac{64}{16}$$

$$N_{bp} = 4 \text{ batteries}$$

III.8 Structure de la source hybride

L'architecture retenue est celle à deux convertisseurs DC/DC en parallèle côté sources d'énergie. Comme il est indiqué sur la (FigureIII.16), chaque convertisseur est lié à une source d'énergie. Les deux convertisseurs DC/DC sont bidirectionnels en courant. Ils ont pour rôle d'adapter les niveaux de tension des éléments de stockage d'énergie à celui du bus de tension continue. De plus, ces convertisseurs permettent de gérer les flux de puissance entre les différents constituants (batterie, supercondensateurs, charge). Côté pack batteries, le niveau de tension varie entre 198.4V et 230.4V avec une tension nominale $V_{\text{batt}} = 204.8\text{V}$ donc le convertisseur est élévateur dans le cas de la décharge de la batterie, puisque le niveau de tension du bus continu vaut $V_{\text{bus}} = 500\text{V}$, et abaisseur dans l'autre sens. Du côté des supercondensateurs, la plage de tension est comprise entre 103.6V et 210.9V. Par conséquent, le deuxième convertisseur est aussi élévateur lors de la décharge des supercondensateurs. Le système de propulsion du véhicule électrique est considéré comme une source de courant. Cette source de courant est capable d'assurer les deux phases de fonctionnement d'un véhicule électrique (phase de traction et phase de récupération d'énergie de freinage). [56]



FigureIII.16 : Topologies des convertisseurs permettant l'association batterie/supercondensateur.

III.8.1 Architecture de la source hybride

La Figure.III.18 montre les constituants des deux convertisseurs associés en parallèle. Chaque convertisseur DC/DC bidirectionnel contient quatre semi-conducteurs : deux MOSFETs et deux diodes. Les deux MOSFETs $T1_{\text{batt}}$ et $T1_{\text{sc}}$ commutent entre l'état passant et bloqué. L'ensemble des MOSFETs $T1_{\text{batt}}$ et $T1_{\text{sc}}$ et des diodes de roue libre $D2_{\text{batt}}$ et $D2_{\text{sc}}$

assurent le transfert du flux de puissance de chaque source dans le mode survolteur. Les MOSFETs $T_{2_{sc}}$ et $T_{2_{batt}}$ permettent avec les diodes $D_{1_{batt}}$ et $D_{1_{sc}}$ l'utilisation des convertisseurs en mode dévolteur [56]

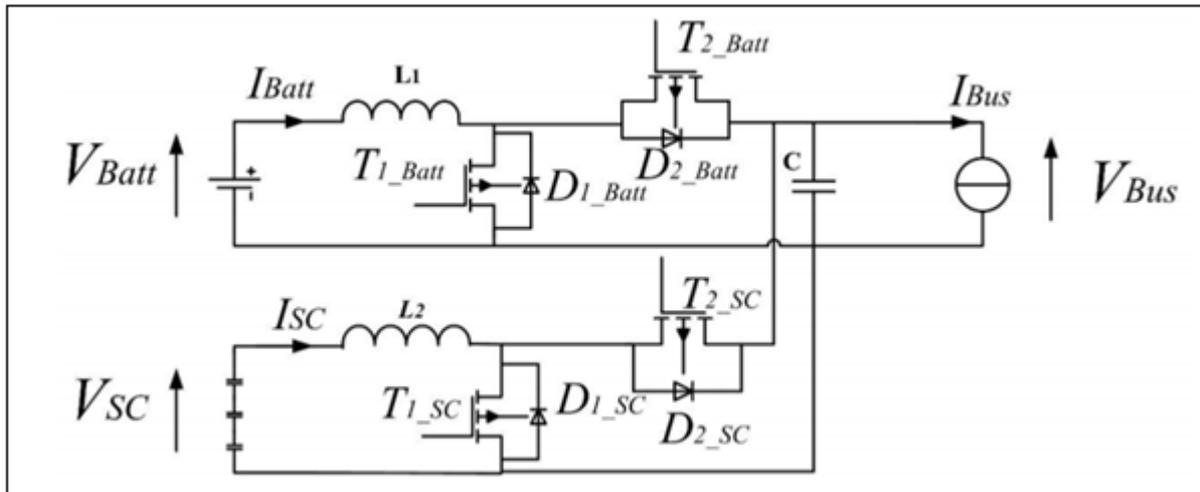


Figure III.17 : Association des convertisseurs DC/DC.

A. Principe de fonctionnement

En supposant que la conduction est continue, l'analyse des modes de fonctionnement nous permet d'obtenir les modèles mathématiques des convertisseurs. Puisque les deux convertisseurs sont identiques, nous focalisons cette étude sur un seul convertisseur bidirectionnel (celui du côté batterie) représenté sur la Figure III.19. Selon l'état des deux interrupteurs $T1_{Batt}$ et $D2_{Batt}$, nous pouvons distinguer les deux phases de fonctionnement décrites ci-dessous : [56]

• La phase active

L'interrupteur $T1_{batt}$ est fermé et la diode $D2_{batt}$ est bloquée. Durant cette séquence, le courant I_{Batt} traversant l'inductance $L1$ augmente linéairement et une énergie WL est stockée dans $L1$, Figure.III.19.

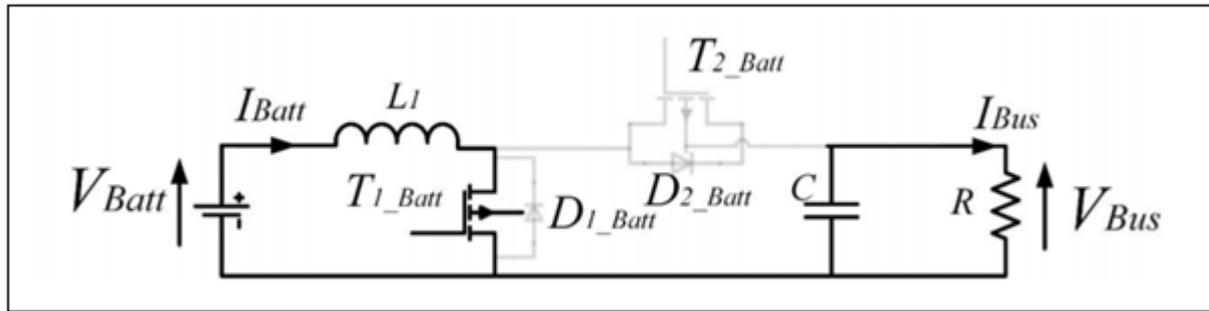


Figure III.18: Phase active.

Pour l'intervalle de temps considéré : (état passant de T1)

$$\begin{cases} L_1 \frac{dI_{batt}}{dt} = V_{batt} \\ C \frac{dV_{bus}}{dt} = -I_{bus} \end{cases}$$

- L_1 l'inductance de lissage,
- C le condensateur de filtrage,
- R la résistance de la charge,
- V_{bus} la tension du bus continu,
- I_{batt} le courant d'entrée du convertisseur,
- I_{bus} le courant de sortie du convertisseur
- V_{batt} la tension de la batterie.

• La phase de roue libre

Lorsque l'interrupteur $T1_{batt}$ est ouvert et la diode $D2_{batt}$ est passante. Durant cette séquence, l'énergie emmagasinée dans l'inductance $L1$ est restituée au condensateur et à la charge R , Figure.III.20.

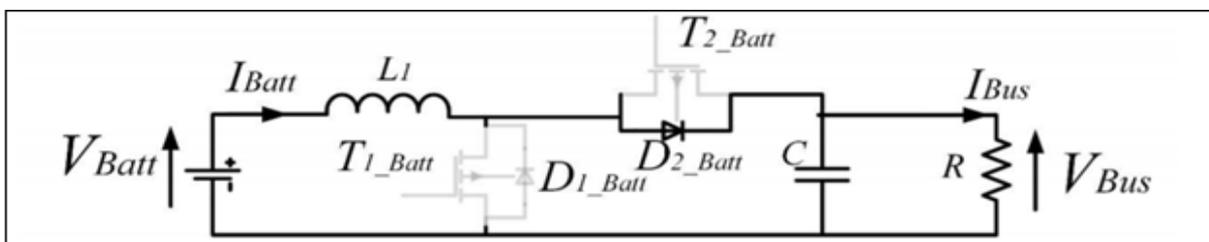


Figure III.19 : Phase de roue libre

$$\begin{cases} L_1 \frac{dI_{batt}}{dt} = V_{batt} - V_{bus} \\ C \frac{dV_{bus}}{dt} = I_{batt} - I_{bus} \end{cases}$$

III.8.2 Stratégies de gestion à base de règles

Cette catégorie de stratégies permet de distribuer la puissance d'une manière efficace et de contrôler les flux énergétiques en temps réel. Néanmoins la solution obtenue n'est pas forcément optimale. Les règles de gestion sont définies au préalable, sur la base d'une expertise ou de modèles mathématiques, et ne nécessitent pas la connaissance du profil de puissance, entre autre le cycle de conduite. Ces règles sont définies par rapport à un ou plusieurs objectifs et elles peuvent être établies par une approche déterministe ou par logique floue par exemple. [56]

III.8.3 Stratégies à base d'optimisation

Dans ces stratégies, les objectifs sont présentés sous forme d'équations en fonction de contraintes physiques comme la vitesse et le couple du véhicule.

Minimiser ces fonctions consiste à chercher les références optimales des contraintes physiques. Les stratégies basées sur l'optimisation se partagent en deux catégories :

- **Optimisation en Temps Réel**

Elle permet d'obtenir une commande des flux énergétiques applicable en ligne et ne nécessite pas la connaissance du profil de conduite par avance. Mais, certains critères doivent être minimisés au détriment de l'optimisation instantanée.

A titre d'exemple, Kermani et al, ont développé un algorithme contenant un modèle prédictif des conditions de conduite.

- **Optimisation globale**

Cette approche nécessite la connaissance du profil de conduite et elle n'est pas applicable en ligne. C'est une méthode qui permet d'avoir une solution optimale et peut prendre en compte plusieurs critères d'optimisation. Sa complexité rend son implémentation en temps réel presque irréalisable, par contre elle est très utile pour l'ajustement d'autres stratégies de gestion. Romaus et al, ont étudié une SEH composée de batteries et supercondensateurs pour l'alimentation d'un VE urbain. Ils ont exploités, séparément, deux approches de programmation : la première était la programmation dynamique déterministe pour l'optimisation du dimensionnement des éléments de la source.

La seconde était la programmation dynamique stochastique en vue de la gestion de la puissance. Cette partie nous a permis de rappeler quelques architectures utilisées dans le cadre de l'hybridation de deux sources d'énergie pour l'alimentation des véhicules électriques. [54]

III.9 Problématique de l'optimisation de la gestion d'énergie

Notre objectif d'optimisation de la gestion de l'énergie dans l'ensemble (batteries, supercondensateurs) est de minimiser l'énergie électrique fournie par la batterie durant un cycle de conduite vitesse /temps.

La puissance des batteries est limitée. Le rôle des supercondensateurs dans le véhicule est de fournir une puissance P_{SC} complémentaire pendant les phases transitoires.

$$P_{SYSPAC} + P_{SC} = P_{MOT}$$

Les supercondensateurs interviennent en cas des fortes accélérations (pics), et à la récupération de l'énergie lors de freinage du véhicule. L'état de charge des supercondensateurs doit être ramené à une valeur de référence à la fin de chaque cycle de fonctionnement pour commencer un autre cycle de conduite. Pour pouvoir appliquer la commande optimale à notre système durant l'intervalle de temps $[t_0, t_f]$.

Les algorithmes permettant de résoudre ce problème d'optimisation sont appelés « lois de gestion d'énergie » ou encore « stratégie de commande ».

Tableau III.1: Flux énergétiques.

Mode	Puissance	Schéma du flux énergétique	Description
Traction	$P_{ME} > 0$ $P_{SYSbatt} > 0$ $P_{SSE} = 0$		Le système batt alimente seul la machine
	$P_{ME} > 0$ $P_{SYSbatt} > 0$ $P_{SSE} > 0$		Le système batt et la source secondaire alimentent ensemble la machine électrique
	$P_{ME} > 0$ $P_{SYSbatt} = 0$ $P_{SSE} > 0$		La source secondaire alimente seule la machine électrique
	$P_{ME} > 0$ $P_{SYSbatt} > 0$ $P_{SSE} < 0$		Le système batt alimente la machine électrique et recharge la source secondaire
Freinage	$P_{ME} < 0$ $P_{SYSbatt} = 0$ $P_{SSE} < 0$		La source secondaire récupère l'énergie cinétique de freinage
	$P_{ME} < 0$ $P_{SYSbatt} > 0$ $P_{SSE} = 0$		La source secondaire récupère l'énergie cinétique de freinage et reçoit également de la puissance du système batt
arrêt	$P_{ME} = 0$ $P_{SYSbatt} = 0$ $P_{SSE} = 0$		Aucun flux énergétique
	$P_{ME} = 0$ $P_{SYSbatt} > 0$ $P_{SSE} < 0$		Le système batt recharge la source secondaire

III.9.1 Contraintes électriques à base de règles (contrôle haut niveau)

Dans ce paragraphe, nous décrivons le deuxième niveau (haut) de contrôle. Cette couche contient les règles qui sont implémentées en fonction des contraintes électriques sur les sources utilisées qui concernent leurs niveaux de tension et les valeurs de courant admissibles, donnés par le constructeur. La plage de tension, à laquelle nous avons maintenu nos supercondensateurs, est dans l'intervalle [103.6V ; 210.9V]. Le choix de cet intervalle de tension permet la possibilité de récupérer 75% de l'énergie stockée dans les

supercondensateurs. La plage de tension autorisée pour l'utilisation de la batterie est de [198.4V ; 230.4V]. Pendant la phase de récupération d'énergie, la priorité de la recharge est affectée aux supercondensateurs afin d'augmenter leur disponibilité.

- **Phase de traction :**

Il s'agit de la phase pendant laquelle le véhicule est en mode traction où le système de stockage doit fournir de l'énergie. Lors de cette phase il y a deux cas possibles. [52]

- Condition 1 ($P_{bus} > P_{batt}$) :

Lorsque la puissance de charge demandée est supérieure à celle de la batterie. Nous devons vérifier si l'état des supercondensateurs (niveau de tension) permet de produire de l'énergie. Dans ce cas, la batterie et les supercondensateurs génèrent l'énergie demandée. Par contre, si les supercondensateurs ne sont pas disponibles (niveau de tension : $V_{SC} < 103.6V$), nous arrêtons la décharge des supercondensateurs et la batterie fournit toute la puissance requise.

- Condition 2 ($P_{bus} < P_{batt}$) :

Lorsque la puissance absorbée par la charge est inférieure à celle disponible aux bornes de la batterie (P_{batt}), la différence de valeur de puissance est utilisée pour charger les supercondensateurs.

- **Phase de freinage :**

Il s'agit de la phase de freinage du véhicule durant laquelle le système de stockage doit récupérer de l'énergie pour se recharger. Dans cette phase, il y a également deux cas possibles. Puisque les supercondensateurs se rechargent en priorité, le système vérifie d'abord leur disponibilité. S'ils sont disponibles ($V_{sc} \leq 210.9V$) alors, on autorise leur recharge. Sinon si ($V_{sc} \geq 210.9V$), on autorise la recharge de la batterie. Dans le cas où, ni la batterie ni les supercondensateurs ne sont disponibles pour la recharge, c'est le freinage rhéostatique qui intervient pour dissiper l'énergie de freinage. [37]

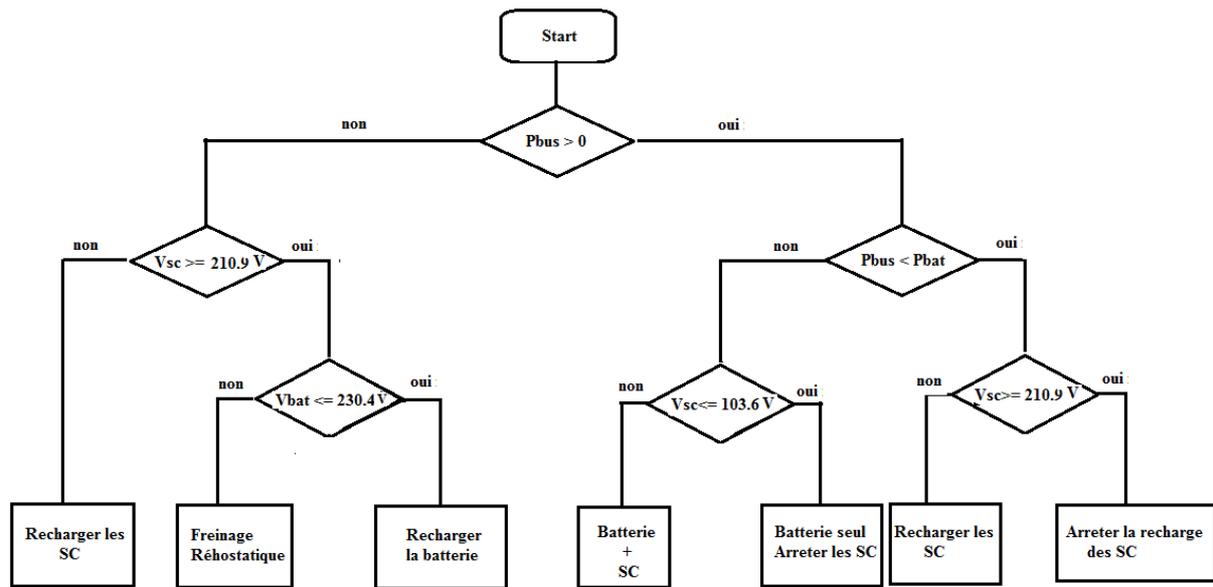


Figure III.20 : Organigramme des règles de gestion d'énergie.

III.9 Résultat et interprétation de la simulation de la source hybride

III.9.1 Résultat de simulation

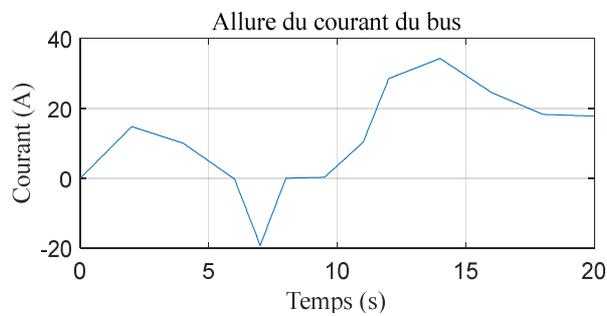
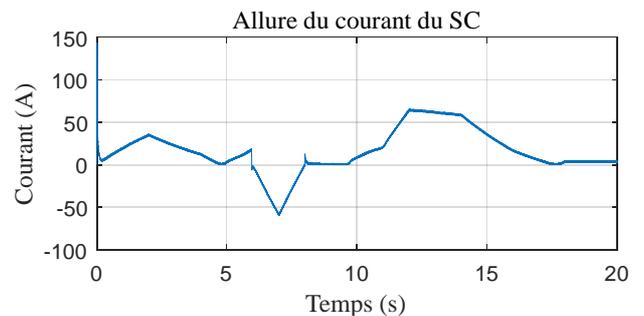
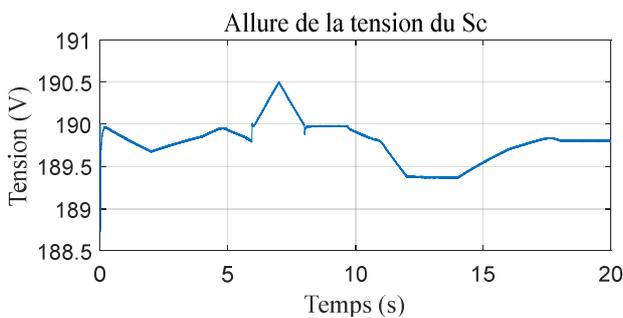


Figure II.21 : Coutant de bus DC



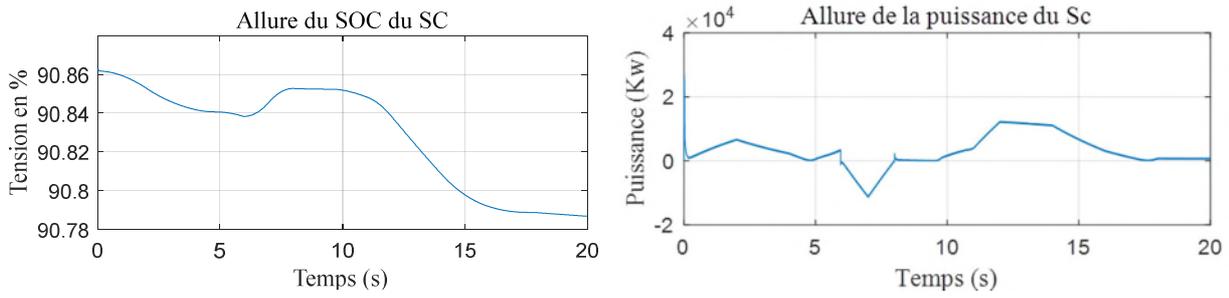


Figure III.22 : Courant et tension SC et la batterie

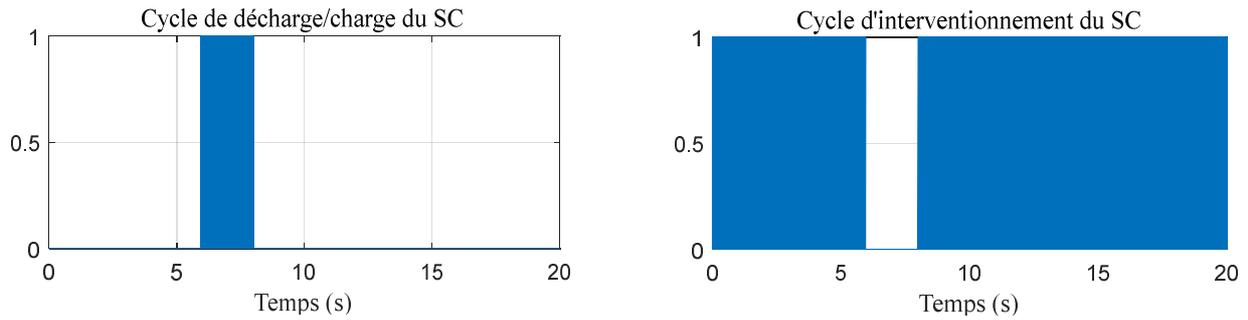


Figure III.23 : Cycle de charge et décharge des SC

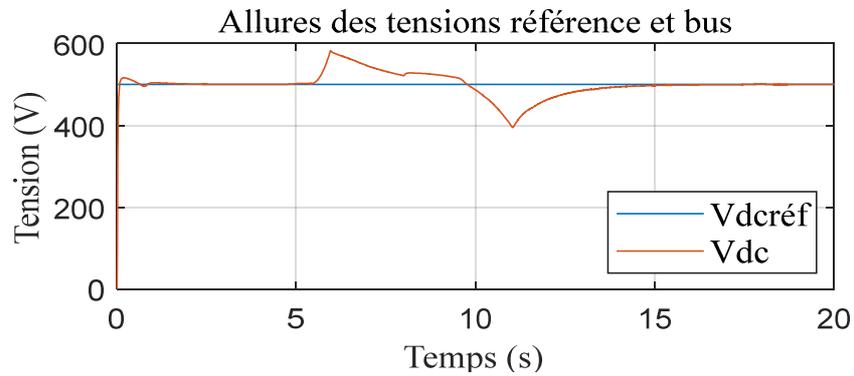


Figure III.24 : Tension du bus et sa référence

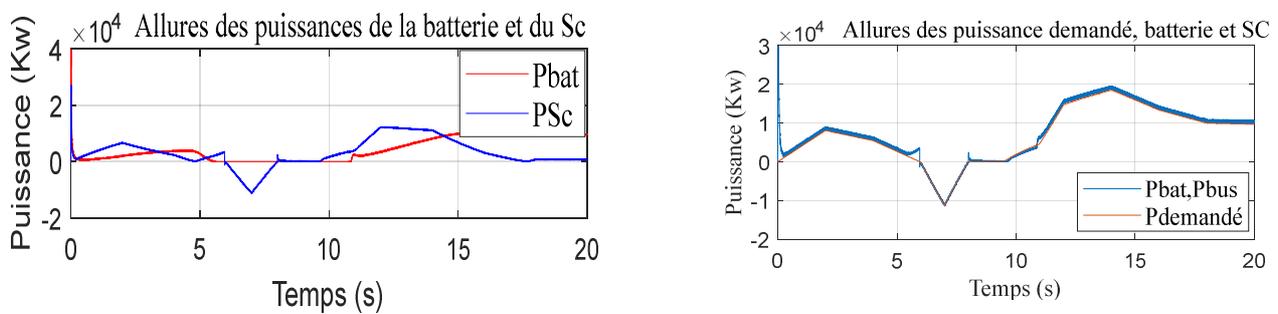


Figure III.25 : Puissance des SC, du pack batterie et la puissance demandé

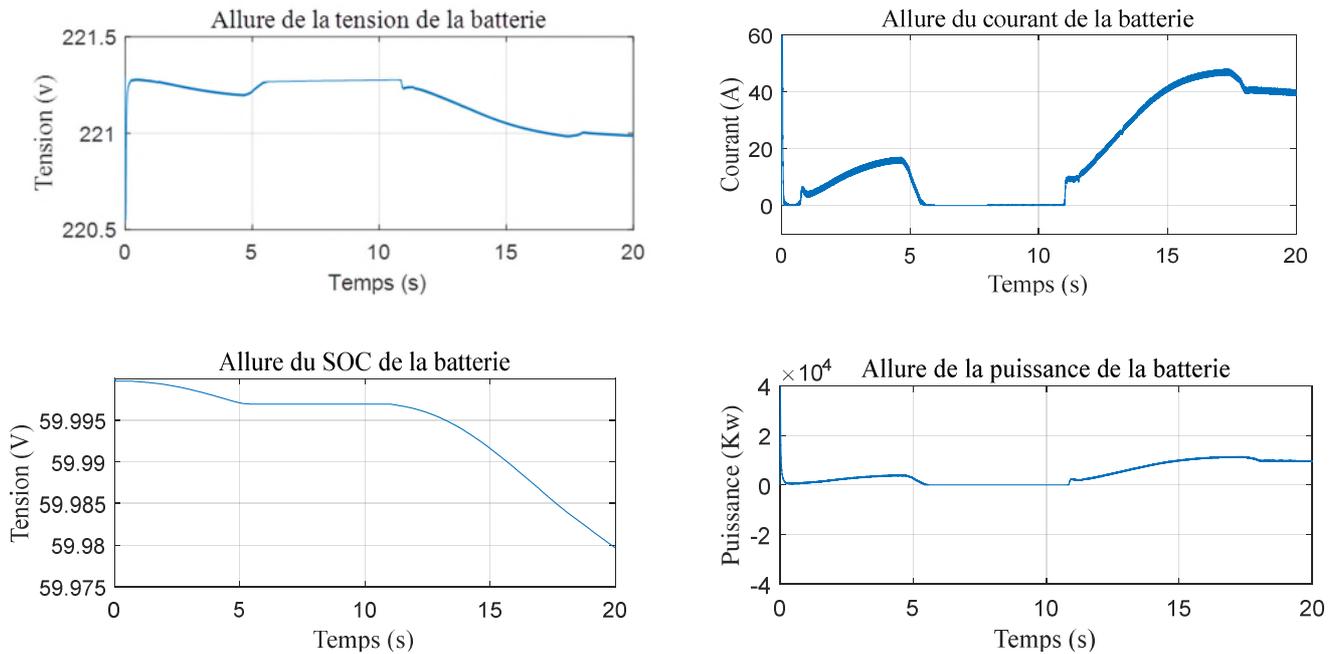


Figure III.26 : courant et tension supercondensateurs et batteries

III.9.2 Interprétation des résultats

On constate que la puissance des batteries et des SC est l'image de leurs courants qui ont la même allure ainsi que la puissance pendant une période de 20s

Ainsi que l'allure des courants des SC et des courants des batteries ainsi que leurs tensions, on constate que de $T=0s$ jusqu'à $T=6s$ les courants de SC et Batterie sont en complémentarité au démarrage les courants des SC sont plus sollicités que ceux des batteries, et à $T=6s$ jusqu'à $T=8s$ les courants des SC prennent des valeurs négatives ce qui correspond à une phase de freinage dans laquelle on voit clairement que la tension des SC augmente dans cette période contrairement à la batterie qui elle se déconnecte et reste dans cette période ce qui est bien notre but de notre gestion d'énergie exploitée dans l'organigramme précédent. Dans un cycle de fonctionnement en mode traction, le véhicule doit varier sa vitesse en suivant le type de profil abordé ou le type de contrainte croisée en chemin. On aperçoit que de $T=0s$ jusqu'à $T=2s$ la puissance des SC est plus sollicitée que les batteries grâce à leurs fortes puissances. Cette figure n'est qu'une bonne réponse à notre choix de gestion qui essaie d'optimiser au maximum les flux énergétiques, il est bien clair que dans cette figure les puissances des batteries et SC suivent parfaitement la demande en puissance.

III.10 Conclusion

Ce chapitre a été consacré au contrôle du moteur et les flux énergétique

On constate les performances de la commande vectorielle qui sont le rejet de la perturbation en un temps très court, la réponse est rapide et le dépassement est négligeable. Cependant l'inconvénient majeur de cette technique de commande se manifeste lors des variations paramétriques de la machine. Qui nécessite que les paramètres de la machine soient stables.

L'intérêt de la gestion de puissance dans un système hybride qui permet de gérer les sources d'énergies et changer le système de stockage, et d'assurer le fonctionnement de système sans interruption.

L'importance de l'hybridation est de permettre un fonctionnement en complémentarité entre les batteries et les supercondensateurs pour bénéficier de l'intérêt de l'un par rapport à l'autre pour un meilleur rendement du système.

CONCLUSION

Conclusion général

Face au défi climatique d'une part et la recherche permanente du confort d'autre part, il est devenu impérative de trouver une alternative aux moyens de déplacement actuels. Même si le réchauffement climatique est utilisé comme un simple slogan politique pour certains, il est évident que nous devons prendre conscience des effets que peut avoir ce fléau à long terme sur notre environnement. Pour parvenir à stopper ou du moins limiter ce réchauffement c'est l'humanité toute entière qui doit œuvrer ensemble et dans le même sens pour y parvenir. Ce travail est notre contribution à l'édification d'un monde plus pur.

Si aujourd'hui des prouesses technologiques sont accomplies dans le secteur des véhicules électriques, il n'en rien il y a deux siècles de cela. Le chapitre I de ce travail montre cette lente évolution chronologique. En effet, elle est due à l'élément limitatif du développement des véhicules électriques qui a toujours été la source d'énergie.

Afin de réaliser un travail complet nous avons touché le maximum de parties du système de traction électrique qui est le cœur des véhicules électriques. Ce système est composé des moteurs électriques, de convertisseurs de puissance et de leurs contrôles/commandes, ainsi que leur source de stockage d'énergie.

Dans ce mémoire on a étudié une technique de la commande vectorielle, appliquée à la machine synchrone à aimants permanents double étoile, et aussi une gestion des flux énergétique embarquée.

Après control de notre machine et interprétation de ces résultats on a constaté les avantages de notre moteur qui on justifie son choix, mais aussi par conséquent on a pu voir qu'elles sont ces inconvénients pour l'application dans les véhicules électriques, et aussi on a pu voir qu'elle est impact de l'hybridation sut le poids et l'autonomie du véhicule, un problème majeur qu'on a cité dans notre travail et qui vaste à résoudre pour aboutir à un véhicule écologique tout d'abord, mais sur tout autonome.

REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques

- [1] Destiny Loukakou Bounzeki Mbemba. Modélisation, Conception et Expérimentation d'un véhicule hybride léger pour usages urbains. Thèse de Doctorat de l'université de Franche-Comté, 2012.
- [2] G.B. Kliman, W.J. Premerlani, R.A. Koegl and D. Hoeweler, *A new approach to on-line faultdetection in AC motors*, IEEE-IAS, Annual meeting Conference, pp. 687-693, CA, 1996.
- [3] J.Belhadj, *Commande directe en couple d'une machine synchrone, structure d'observation, Application aux systèmes multi-machine multi-convertisseur*, Thèse de Doctorat, ENIT-INPT, juillet 2001.
- [4] B.Multon, *Problème de la motorisation d'un véhicule électrique (première partie)*, école normale supérieure de cachan, département EEA, LÉSIR.
- [5] N.Romani, *Modélisation et commande du système d'alimentation en air pour le module de puissance d'un véhicule à pile à combustible avec reformeur embarqué*, Thèse de Doctorat, Université de Paris Sud, 24 Septembre 2007.
- [6] S.Meddah, *Modélisation et commande d'un véhicule électrique à piles à combustible*, thèse de magistère, Université des Sciences et la Technologie d'Oran Mohamed BOUDIAF.
- [7] J.Bernard, *Véhicules hybrides à pile à combustible : dimensionnement et Stratégies de commande*, Thèse de Doctorat, l'université de valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, décembre 2007.
- [8] N.Brahmi, Z.Chanoun, *Introduction des Machines synchrones à Double Alimentation dans les Véhicules Electriques*, Mémoire de fin de cycle, Université A.MIRA-BEJAIA, Juin 2012.
- [9] R.Schmitz, *Travaille de maurité la voiture electrique, comme alternative réaliste à la voiture à essence*, Juin 2007.
- [10] N. Khalil. *Stratégies de commande et techniques intelligentes appliquées aux machines de type synchrone*. Thèse Doctorat, Université Mentouri Constantine, 2010.
- [11] A.Yahdou, *Commande et observavation par mode glissant d'une mahine synchrone double étoile sans capteur mécanique*, Université de Hassiba Benbouali de Chlef, Avril 2011.
- [12] A.Florescu, *Gestion optimisée des flux énergétiques dans le véhicule électrique*, thèse de Doctorat de L'université De Grenoble, Novembre 2012.
- [13] S. K. El khil. *Commande vectorielle d'une machine synchrone doublement alimentée. Optimisation des pertes dans les convertisseurs reconfiguration de la commande pour un fonctionnement sécurisé*. Thèse de doctorat de l'institut polytechnique de Toulouse, 2006.
- [14] F.DELFOSSE. *Détermination de l'état de charge des batteries d'un véhicule électrique*. Ingénieur, Université de Liège 1998.
- [15] W.Lajnef, *Modélisation des supercondensateurs et évaluation de leur vieillissement en cyclage actif à forts niveaux de courant pour des applications*

Références bibliographiques

- véhicules électriques et hybrides*, délivré par l'université de Bordeaux 1. Thèse Doctorat, 5 décembre 2006.
- [16] S. Azib, A. A. Zaidi, *Etude d'un Système de Stockage par un Supercondensateur*, délivré par l'université A. Mira de Bejaia, Juin 2017.
- [17] M. ANSOUMANE CAMARA. *Modélisation du stockage de l'énergie photovoltaïque par supercondensateurs*, Institut Polytechnique de CONAKRY – Université Gamal Abdel Nasser – Guinée, thèse doctorat, 4 juillet 2011
- [18] N. Maherzi, *Etude Conception et réalisation d'un convertisseur d'énergie DC/DC associée à des supercondensateurs*, Conservatoire national des arts et métiers Lyon, Novembre 2010.
- [19] G. Bailly, *Simulation multi-domaines d'un système de propulsion hybride électrique sous l'environnement MATLAB/SIMULINK*, Université du Québec, Décembre 2006.
- [20] P. Duysinx, *Performances et comportement des véhicules*, Université de Liège Année Académique 2016-2017.
- [21] D. Hadiouche, *Contribution à l'étude de la machine synchrone double étoile : modélisation, alimentation et structure*, Thèse de Doctorat de l'Université Henri Poincaré de Nancy I, France, Décembre 2001.
- [22] H. Amimeur, *Contribution à la Commande d'une Machine synchrone Double Etoile par Mode de Glissement*, Mémoire de Magister, Université El Hadj Lakhdar de Batna, Mai 2008.
- [23] N. Moubayed, F. Meibody-Tabar, B. Davat, "Alimentation par deux onduleurs de tension d'une machine synchrone double étoile", *Revue Internationale de Génie Electrique*, Vol. 1, No. 4, 457-470, 1998.
- [24] R. Abdessemed, M. Kadjoudj, *Modélisation des machines électriques*, Presses de l'Université de Batna, Algérie, 1997.
- [25] L. BAGHLI, *Modélisation et Commande de la Machine synchrone*, notes de cours, IUFM de Lorraine – UHP, 2003/2004.
- [26] S. Chekkal, D. Aouzellag, K. Ghedamsi, H. Amimeur, *New control strategy of wind generator based on the dual-stator induction generator*, 10th International Conference on Environmental and Electrical Engineering IEEE, pp. 268–271, Rome, Italy, 2011.
- [27] H. Ney, *Equipements de puissance*, Editions Fernand Nathan, Paris, 1988.
- [28] G. Crellet, G. Clerc, *Actionneurs électriques*, Editions Eyrolles, Paris, France, 1997.
- [29] Document/support technique MATLAB.
- [30] P. Vyroubal, J. Maxa and T. Kazda, *Simulation of the Behavior of the Lithium Ion Battery*, Brno University of Technology, Czech Republic, juin 2014.
- [31] I. Baboselac, Zeljko HEDERIC, Tin BENSIC, *MATLAB SIMULATION MODEL FOR DYNAMIC MODE OF THE LITHIUM-ION BATTERIES TO POWER THE EV*.

Références bibliographiques

- [32] D.Bang Viet, *Conception d'une interface d'électronique de puissance pour Pile à Combustible*, Thèse doctorat Université Joseph Fourier.2006.
- [33] I.Baadji, *Optimisation de la commande d'un variateur de vitesse à base d'une pile PEMFC* Mémoire de Magistère, Université Mohamed Boudiaf-M'sila, 2014.
- [34] Document/ support technique MATLAB.
- [35] DeghbodjImene, *commande des systemes non lineaires par mode glissant d'ordre superieur*, Mémoire de magistère, Université Constantine 1, Novembre 2013.
- [36] Dendouga, *Commande par mode glissant de la machine synchrone à double alimentation alimentée par onduleur de tension*, Mémoire de Magister de l'Université de Batna, 2004.
- [37] M.Nezar, *Diagnostic des associations convertisseurs statiques-machines asynchrone en utilisant les techniques de l'intelligence artificielle*, thèse de doctorat, Université de Batna.
- [38] A. L. Nemmour, *Contribution à la commande vectorielle de la machine synchrone à double alimentation*, Mémoire de Magister de l'Université de Batna, Avril 2002.
- [39] A. Saibi, M. O. H. Mahmoudi, L. Nazli, *Commande par mode de glissement d'une machine synchrone double étoile alimentée par onduleurs à MLI à trois niveaux*, 4th International Conférence on Electrical Engineering, CEE'06, Batna University, pp. 215–220, 7–8 November 2006.
- [40] S. J. Huang, H. Y. Chen, *Adaptive sliding controller with self-tuning fuzzy compensation for vehicle suspension control*, Science Direct, Mechatronics 16, pp. 607–622, 2006.
- [41] M.Kercha, *Commande par mode de glissement d'un moteur pas à pas à aimant permanent*, Mémoire de Magister de l'Université de Batna,2005.
- [42] M.A.Fnaiech, F.Betin, F.Fnaiech, G.A.Capolino, *Sliding mode control for dual three- phase induction motor drives*, IEEE ISIE, Montréal, Québec,Canada, pp. 2281–2285, July 9–12 2006.
- [43] C.P.Coleman, D.Grodbble, *A comparison of robustness fuzzy logic, PID, sliding modeControl*, IEEE, pp.1654-1659, 1994.
- [44] C.C.D.Wit, *Commande des moteurs asynchrones. 2 – Optimisation, discrétisation et observateurs*, Hermès Science Publication, Paris, 2000.
- [45] A.Florescu, *Gestion optimisée des flux énergétiques dans un véhicule électrique*, Thèse de doctorat de l'université de Grenoble, 19 novembre 2012.
- [46] A.Jaoui, S.Labdouni, P.Delarue, A.Chieliens, *PFE Véhicule électrique*, Université Lille1 Sciences Technique. 2015.
- [47] K.Iffouzar, *etude et contrôle des machines synchrones polyphasées en modes normal et dégradé. application dans un système embarqué*, Thèse de Doctorat, Université A.Mira-Bejaia, décembre 2016.

Références bibliographiques

- [48] FERRIEUX, J.-P., FOREST, F. Alimentations à découpage Convertisseurs à résonance. Principes composants –modélisation, Dunod, 3e édition (2001).
- [49] LAZAROV, V., ROYE, D., ZARKOV, Z., SPIROV, D. Analysis of DC converters for wind generators. Proceedings of the XVI International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies SIELA 2009, 4–6 June 2009, Bourgas, Bulgaria.
- [50] O. Ibrahim, N. Z. Yahaya, and N. Saad, “Comparative studies of PID controller tuning methods on a DC-DC boost converter,” in *2016 6th International Conference on Intelligent and Advanced Systems (ICIAS)*, 2016, pp. 1–5.
- [51] A. Devie, “Characterization of Lithium-ion batteries usage in electric and hybrid electric vehicles applications”. Thèse de doctorat, Université Claude Bernard - Lyon I, 2012.
- [52] S. Shili, A. Hijazi, P. Venet, A. Sari, X. Lin-Shi, and H. Razik, “Balancing circuit control for supercapacitor state estimation,” in *2015 Tenth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER)*, 2015, pp. 1–7.
- [53] A.-L. Allègre, “Méthodologies de modélisation et de gestion de l’énergie de systèmes de stockage mixtes pour véhicules électriques et hybrides,” 2010.
- [54] J. Jaguemont, “Gestion thermique d’un pack de batteries lithium-ion en conditions hivernales incluant le vieillissement. Thèse de doctorat, Trois-Rivières, Université du Québec à Trois-Rivières, 194 p.,” 2015.
- [55] M. Petzl, M. Kasper, and M. A. Danzer, “Lithium plating in a commercial lithium-ion battery – A low-temperature aging study,” *J. Power Sources*, vol. 275, pp. 799–807, Feb. 2015.
- [56] S. Tippmann, D. Walper, L. Balboa, B. Spier, and W. G. Bessler, “Low-temperature charging of lithium-ion cells part I: Electrochemical modeling and experimental investigation of degradation behavior,” *J. Power Sources*, vol. 252, pp. 305–316, Apr. 2014.

ANNEXES

Annexe A

Méthode de calcul des temps de charges des batteries

I.1.charge normal (monophasé) 230 V

Puissance = 3.7kva courant =16A

$$P = 16 \times 230 = 3680w$$

$$\text{Temps de charge} = \frac{E_{batt}}{P} = \frac{24.576}{3.686} = 6.6h$$

Puissance = 7.4 kva courant 32A

$$P = 32 \times 230 = 7360 w$$

$$\text{Temps de charge} = \frac{E_{batt}}{P} = \frac{24.576}{7360} = 3.3h$$

I.1.1 charge semi-rapide (triphase) 400V

Puissance = 11.1kva courant = 16A

$$P = \sqrt{3} 16 \times 400 = 11085.25 w$$

$$\text{Temps de charge} = \frac{E_{batt}}{P} = \frac{24.576}{11.08525} = 2.2h$$

Puissance = 22.2 kva courant = 32A

$$P = \sqrt{3} 32 \times 400 = 22170.25w$$

$$\text{Temps de charge} = \frac{E_{batt}}{P} = \frac{24.576}{22.17025} = 1.1h$$

I.1.2 charge rapide (triphase) 400V

Puissance = 43.6kva courant = 63A

$$P = \sqrt{3} 63 \times 400 = 43647.68 w$$

$$\text{Temps de charge} = \frac{E_{batt}}{P} = \frac{24.576}{43.64768} = 0.5h$$

II.1 paramètre du véhicule

Masse du véhicule m	1500 kg
Surface frontale du véhicule A_f	1.8m ²
Inertie de la roue R	0.3m
Coefficient de résistance au roulement Pneu μ	0.015
Coefficient de traînée aérodynamique C_w	0.25
Constante de l'accélération gravitationnelle g	9.81m/s ²
Coefficient de Stokes kA	0.22
Densité de l'air ξ	1.23 kg/m ²
Rapport de transmission i	16.81

II.2 paramètre de la machines

Flux ϕ	2.08 Wb
Puissance nominale P _n	25 kW
Nombre de pair de pôles P	4
Moment d'inertie J	0.087
L _d , L _q , M _d , M _q	24mH, 31.4mH, 14.6mH, 22.1mH
Fréquence nominale F	50 Hz
Courant efficace nominale I _n	22.5 A
Vitesse de rotation nominale N _n	750 tr/mn
Résistance statorique	0.64 Ω

ANNEXE B

I. Poids des batteries et supercondensateurs

	Poid du module	Poid du pack
Batterie	3.8 kg	243.2 kg
Supercondensateur	0.160 kg	79.68 kg

I. Fiche technique des batteires et supercondensateurs