

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université A.MIRA Bejaïa
Faculté de la technologie
Département de génie électrique



Mémoire de fin d'étude

En vue de l'obtention du diplôme de master en électrotechnique

Thème

Systeme hybride à pile à combustible et super condensateur : structures, contrôle et gestion d'énergie (application traction électrique).

Réalisés par :

Mr : BOURNINE Lamine

Mr : YAHIAOUI Nadir

Encadré par :

Mr : AMROUCHE Bessam

Année Universitaire : 2022

Remerciements

Nos remerciements s'adressent tout d'abord au Dieu tout puissant de nous avoir donné tous ce que nous possédons et de guider nos pas vers le chemin du savoir.

Nous tenons à exprimer nos haute gratitude, nos profonds respects et nos sincères remerciements et reconnaissances d'abord à Monsieur AMROUCHE BESSAM, qui nous a guidé avec grande patience tout au long de l'élaboration de ce travail.

Nous adressons nos chaleureux remerciements aux membres du jury, qui nous fait l'honneur d'accepter d'examiner ce travail.

Dédicace

*GRACE À DIEU TOUT PUISSANT ET EN SIGNE DE RECONNAISSANCE À
TOUS LES SACRIFICES*

*CONSENTIS POUR MA RÉUSSITE ET LA VOLONTÉ POUR MENER À BIEN
CE MODESTE TRAVAIL.*

QUE JE DÉDIÉ :

*À MES CHERS PARENTS MA MÈRE ET MON PÈRE ;
POUR LEURS PATIENCES LEURS SOUTIENS ET LEURS
ENCOURAGEMENTS.*

*À MON FRÈRE AMINE,
ET MES SŒURS (LYNDA ET AMINA).*

*MES AMIS ET AMIES DE PAR LE MONDE QUI N'ONT CESSÉ DE
M'ENCOURAGER.*

*MES CAMARADES AVEC QUI J'AI PASSÉ DES MOMENTS INOUBLIABLES
DURANT TOUTE MA FORMATION UNIVERSITAIRE.*

*MON ENCADREUR MR AMROUCHE.B POUR SON AIDE ET SA PRÉCIEUSE
ATTENTION.*

*À TOUTES MES ENSEIGNANTS DU DÉPARTEMENT
D'ÉLECTROTECHNIQUE.*

NADIR

Dédicace

*GRACE À DIEU TOUT PUISSANT ET EN SIGNE DE RECONNAISSANCE À
TOUS LES SACRIFICES*

*CONSENTIS POUR MA RÉUSSITE ET LA VOLONTÉ POUR MENER À BIEN
CE MODESTE TRAVAIL.*

*JE DÉDIE CE MÉMOIRE À MA MÈRE QUI M'A ENTOURÉ D'AMOUR,
D'AFFECTION ET QUI FAIT TOUT POUR MA RÉUSSITE,
POUR SON SACRIFICE QU'ELLE A CONSENTI POUR MON INSTRUCTION.
ET MON BIEN ÊTRE DURANT MON PARCOURS MON PÈRE*

« LAH IRAHMO »,

*QUI M'A AIDÉ À DEVENIR CE QUE JE SUIS AUJOURD'HUI. RIEN AU
MONDE NE VAUT LES EFFORTS FOURNIS JOUR ET NUIT POUR MON
ÉDUCATION.*

*CE TRAVAIL EST LE FRUIT DE TES SACRIFICES QUE TU AS CONSENTIS
POUR MON ÉDUCATION ET MA FORMATION.*

*À MON CHER FRÈRE (JAPO) LES MOTS NE SUFFISENT GUÈRE
POUR EXPRIMER ATTACHEMENT,
À MA FAMILLE MES PROCHES QUI M'ONT ENCOURAGÉ.*

*À MES AMIS MES CAMARADES AVEC QUI J'AI PASSÉ DES MOMENTS
INOUBLIABLES DURANT TOUTE MA FORMATION UNIVERSITAIRE.*

*À MON ENCADREUR MONSIEUR B. AMROUCHE POUR SA DISPONIBILITÉ,
SES EFFORTS ET SES NOMBREUX CONSEILS.*

LAMINE

Abréviation

PAC : pile à combustible.

SC : super-condensateur

VE : véhicule électrique.

SysPAC : système PAC.

SSE : source secondaire d'énergie.

ME : machine électrique.

VHP : véhicule hybride parallèle.

VHS : véhicule hybride série.

Ni-Cd : Batteries Nickel-Cadmium.

Ni-MH : Batteries Nickel-Hydrure métallique.

Li-ion : Batteries au Lithium-ion.

AFC : La pile à combustible alcaline ou alkaline fuel cell.

PEMFC : La pile à combustible à membrane échangeuse de proton (polymère électrolyte membrane fuel cell).

DMFC : La pile à combustible à méthanol direct (direct méthanol fuel cell).

PAFC : La pile à combustible à acide phosphorique (phosphorique acide fuel cell).

SOFC : La pile à combustible à oxyde solide (solide oxyde fuel cell).

MCFC : La pile à combustible à carbonates fondus (molten carbonate fuel cell).

MSAP : machine synchrone a aimant permanent.

SOMMAIRE

Abréviation.....	i
SOMMAIRE	ii
Introduction générale.....	1

Chapitre I

Etat de l’art du véhicule électrique.....	3
I.1. introduction	3
I.2. Définition véhicule électrique	3
I.3. Historique.....	4
I.4. Les différents types de voiture électriques.....	7
I.4.1. Voiture hybride.....	8
I.4.1.1. Principe hybride	9
a. Le mode thermique pur.....	9
b. Le mode électrique pur	9
c. Le mode hybride.....	9
I.4.2. Voiture à hydrogène	11
I.4.2.1. Principe de la pile à combustible à l'hydrogène :.....	12
I.5. Architecture des véhicules électriques	13
I.5.1. Batterie.....	14
I.5.2. Moteur	14
I.5.3. Super-condensateur	14
I.5.4. Convertisseur réversible	14
I.5.5. Hacheur DC/DC	15
I.5.6. Calculateur.....	15
I.6. Infrastructures de recharge	16

I.6.1. Les différents types pour les bornes de recharges	16
I.6.1.1. Recharge lente avec du courant alternatif à 3 kW	16
I.6.1.2. Recharge accélérée toujours en courant alternatif mais à 22 kW	16
I.6.1.3. Recharge rapide depuis du courant continu à 43 kW	16
I.7. Quelques exemples de véhicules électriques	16
I.8. Conclusion.....	19

Chapitre II

Présentation et représentation des différents organes d'un véhicule hybride	20
II.1. Introduction.....	20
II.2. Éléments constituant un véhicule hybride	20
II.3. Principales architectures de véhicules hybrides.....	21
II.3.1. Architecture série (VHS).....	21
II.3.2. Architecture parallèle (VHP).....	21
II.3.2.1. La structure parallèle directe (Figure II.4).....	22
II.3.2.2. La structure parallèle à deux convertisseurs (Figure II.5)	23
II.3.2.3. La structure parallèle à un convertisseur (Figure II.6).....	23
II.3.3. Le sous-système électrique.....	24
II.3.3.1. La machine électrique.....	24
a. Les machines à courant continu.....	24
b. Les machines asynchrones.....	24
c. Les machines synchrones à aimants permanents.....	24
d. Les machines à réluctance variable	25
II.3.3.2. Les convertisseurs.....	25
A. Hacheur DC/DC	25
II.3.3.3. Batteries	26
a. Caractéristiques des batteries.....	27
b. Batteries Plomb-Acide.....	27

c.	Batteries Nickel-Cadmium (Ni-Cd).....	28
d.	Batteries Nickel-Hydrure métallique (Ni-MH)	29
e.	Batteries au Lithium-ion.....	30
II.3.3.4.	Super-condensateurs	31
a.	Principe de fonctionnement des SCs	31
II.3.3.5.	pile à combustible	32
a.	Description.....	32
b.	Types de piles à combustible.....	32
c.	Architecteur de la pile à combustible	34
II.4.	Conclusion	35

Chapitre III

Modélisation des différents organes d'un véhicule hybride.....	36
III.1. Introduction.....	36
III.2. Modélisation de la machine	36
III.2.1. Mise en équation de la machine synchrone dans le repère triphasé (a-b-c).....	36
III.2.1.1. Equations électriques.....	37
III.2.1.2. Equations du flux.....	37
III.2.1.3. Equations mécaniques	38
III.2.2. Transformation de Park.....	38
III.2.3. Modèle de la machine synchrone dans le repère de Park (d-q).....	39
III.2.3.1. Equations électriques.....	39
III.2.3.2. Equations des flux	39
III.2.3.3. Expression de la puissance et du couple électromagnétique	40
III.2.3.4. Equations mécaniques	40
III.2.4. Commande vectorielle de la MSAP alimenté en tension.....	41
III.2.4.1. Principe de la commande vectorielle.....	41
III.2.4.2. Description du système global	43

III.2.4.3. Découplage	43
III.2.4.4. Découplage par compensation.....	44
III.3. Modélisation des convertisseurs	45
III.3.1. L'onduleur triphasé.....	45
III.3.1.1. Modélisation de l'onduleur de tension.....	45
III.3.2. Les convertisseurs DC-DC (hacheurs).....	47
a. Convertisseur Boost (élevateur de tension)	47
b. Convertisseur buck-Boost.....	49
III.4. Modélisation de la batterie.....	51
III.4.1. Modélisation de Capacité C _{batt}	51
III.4.1.1. Equations de la tension de décharge.....	52
III.4.1.2. Equations de la tension de charge	52
III.5. Modélisation de la pile à combustible PEMFC	53
III.5.1. Pertes d'activation.....	54
III.5.2. Pertes ohmique	55
III.5.3. Pertes de concentration	56
III.5.4. Caractéristique électrique de la pile à combustible.....	56
III.5.4.1. Caractéristique tension-densité de courant d'une PEMFC.....	56
III.5.4.2. Caractéristique puissance-densité de courant d'une PEMFC.....	57
III.6. Modélisation des super-condensateurs	57
III.6.1. Modèle des supercondensateurs à deux branches RC.....	58
III.6.2. Modèle d'une cellule sans branche lente	58
III.7. Conclusion	60

Chapitre IV

La gestion d'énergie	61
IV.1. Introduction	61
IV.2. Le stockage d'énergie	61

IV.2.1. La source secondaire d'énergie	61
IV.2.2. Source d'énergie irréversible.....	62
IV.2.3. Source d'énergie réversible	62
IV.3. Hybridation des sources d'énergie.....	62
IV.3.1. Principe d'hybridation des sources d'énergie	63
IV.3.2. Solutions d'hybridation des sources d'énergie	64
IV.3.2.1. Hybridation des Piles à Combustible (PAC).....	64
IV.4. La gestion d'énergie à bord du véhicule	64
IV.5.1. Problématique de l'optimisation de la gestion d'énergie	65
IV.5.2. Algorithme de stratégie de la commande dans un VH.....	66
IV.6. Méthodes de gestion d'énergie	69
IV.7. Stratégies de gestion de l'énergie.....	70
IV.7.1. Stratégies de gestion à base de règles	70
IV.7.2. Stratégies à base d'optimisation	71
IV.8. Système globale de la gestion d'énergie	73
IV.9. Résultats de simulation.....	74
Conclusion Générale	82
Liste des figures	83
Liste des tableaux	86
Références	87
Annexe.....	91



Introduction générale

Introduction générale

L'automobile a fait l'objet de critiques importantes surtout dans ses conséquences environnementales (utilisation d'énergies non renouvelables, pollution atmosphérique et sonore) Au tournant du XXe siècle et au XXIe siècle, l'automobile, qui a déjà été confrontée aux différents chocs pétroliers, doit faire face désormais à la raréfaction inéluctable du pétrole, au réchauffement climatique et aux restrictions d'émissions polluantes imposées à l'industrie dans son ensemble. Afin de pallier ces problèmes, l'industrie automobile s'active à la conception de nouvelles voitures n'utilisant pas le pétrole comme source d'énergie. Parmi les solutions avancées par les constructeurs automobiles, on retrouve les voitures fonctionnant aux carburants biologiques tels que l'essence à éthanol, celles utilisant l'énergie solaire ou fonctionnant à l'aide d'une batterie, autrement dit, les voitures électriques.

Le véhicule électrique est encore qu'au stade expérimental et sujet à modification ou à amélioration. Comme toute chose, les voitures adoptant ce type de consommation possèdent des avantages ainsi que des inconvénients. La plus grande force de cette catégorie de voitures repose sur la nature électrique de son moteur. À la fois pour des raisons techniques car les moteurs électriques sont plus souples que les moteurs thermiques (couple élevé à basse vitesse) et ont un meilleur rendement, mais aussi pour des raisons sociétales.

Par conséquent, l'exploitation de ces véhicules ne devrait pas rencontrer de problèmes majeurs dans la mesure où ces véhicules peuvent être assimilés aux autres équipements électriques qui ne nécessitent qu'une source pour fonctionner.

Dans le cas des automobiles, ces sources serviront à charger l'accumulateur qui stocke l'énergie dispensée au moteur. Cette nature électrique engendre également plusieurs avantages, à commencer par une émission de matières polluantes quasi-inexistante pendant le roulage, dans le sens où ce type de voiture ne dégage plus de gaz et ne nécessite plus l'utilisation de produits polluants tels que l'huile de vidange ou le liquide de refroidissement.

La voiture électrique est très adaptée aux conditions urbaines dans la mesure où elle ne consomme d'énergie ni dans le freinage ni dans les embouteillages et s'auto-recharge dans les descentes. Quant à ses inconvénients, ils sont tout aussi multiples et vont des conditions de production de l'énergie électrique aux différents coûts de la voiture et surtout au stockage embarqué de l'énergie. Une voiture électrique n'est réellement écologique que si l'énergie électrique qu'elle consomme est produite à partir de sources renouvelables (centrales solaires, hydrauliques, éoliennes...) Elle ne permet pas non plus d'effectuer de longs trajets à cause de sa faible autonomie et sa vitesse limitée.

Introduction générale

Afin de pallier ces faiblesses, les constructeurs tendent à développer des véhicules qui sont à la fois moins polluants et qui possèdent une autonomie suffisante. Cela paraît possible en associant les avantages du véhicule traditionnel à combustible à ceux du véhicule électrique. Ce nouveau type de véhicule est le *véhicule hybride*.

Dans le premier chapitre de ce mémoire, nous avons présenté le véhicule électrique d'une façon générale, ces différentes typées et leurs modes de fonctionnement. Il aborde ainsi l'architecture des véhicules électriques et à la fin nous donnerons quelques exemples de véhicules électriques récents.

Le chapitre 2 est consacré à présenter et représenter les différents organes de véhicule hybride. Dans ce chapitre on présente un bref sur le modèle hybride parallèle, et puis on décrit le super-condensateur et son principe de fonctionnement, s'achevant avec la pile à combustibles, ces différents types, l'architecture d'une PAC, et le sous-système mécanique.

Le chapitre 3 est focalisé sur la modélisation des différents organes d'un véhicule hybride.

Dans le quatrième chapitre, nous allons réaliser la gestion de puissance du système hybride et les différentes stratégies de commande pour une conduite optimale d'un véhicule hybride. Enfin nous présenterons les résultats des simulations effectuées sur le modèle de véhicule hybride avec le logiciel MATLAB.

On termine par une conclusion générale et quelques perspectives.

A blue graphic element resembling a scroll, with a vertical strip on the left side and rounded corners. The text is centered within the main rectangular area of the scroll.

Chapitre I
Etat de l'art du véhicule
électrique

I.1. introduction

La voiture électrique a été souvent considérée comme une technologie pleine d'avenir et qui donne des espérances pour mettre fin à cette pollution alarmante de l'atmosphère due au secteur de transport routier, capable de prendre une importante part de marché, mais qui n'y est pas arrivée. Cet échec s'explique principalement par la concurrence, disposant d'une technologie bien établie : le moteur à explosion, qui a profité des économies d'échelle, du faible coût du carburant et des subsides.

Conçues pour lutter efficacement contre la pollution, les véhicules électriques sont, malheureusement, freinés par leurs coûts élevés, leur autonomie limitée qui dépend de la capacité des batteries, le manque d'investissements et d'autres problèmes critiques qui handicapent cette invention.

L'objectif de ce premier chapitre est de présenter un bref historique, quelques généralités sur les véhicules électriques, les composants et les infrastructures de recharge nécessaires au fonctionnement des véhicules électriques.

I.2. Définition véhicule électrique

Les véhicules électriques correspondent à l'ensemble des véhicules équipés d'un ou plusieurs moteurs fonctionnant principalement avec une propulsion électrique.

Compte tenu des progrès scientifiques et technologiques accomplis dans le domaine de l'électronique de puissance, les systèmes de gestion de l'énergie, ... etc., beaucoup d'idées et de nouvelles conceptions sont explorées pour développer ce mode de propulsion [1].

Le système de propulsion électrique a une architecture très simple. Il est constitué d'un actionneur électrique, un dispositif de transmission, et des roues **Figure I.1**.

1. Batteries
2. Moteur
3. Transmission
4. Freins
5. Régulateur



Figure I. 1: Le système de propulsion électrique

I.3. Historique

Le premier véhicule électrique à voir le jour est un train miniature mû par un moteur électromagnétique construit par l'Américain Thomas Davenport en 1834. Il faudra attendre près d'une dizaine d'années et de nombreux prototypes à travers le monde pour voir circuler la première voiture électrique construite par Davenport et l'écossais Robert Davison en 1842.

C'est près de 40 ans plus tard que roulera la première voiture thermique munie d'un moteur à combustion interne. En 1852 les voitures électriques commencent à être commercialisées et quelques années plus tard, elles connaissent leur premier essor. Il est lié aux améliorations des capacités de stockage des batteries apportées par Gaston Planté en 1865, puis Camille Faure en 1881.



Figure I. 2 : Première voiture électrique au monde

Chapitre I : Etat de l'art du véhicule électrique

La première marque produisant des voitures électriques en série est créée à Paris en 1893. Une flotte de taxis électriques est déployée pour la première fois dans la ville de New York en 1897.



Figure I. 3 : *Deux voitures électriques des postes parisiennes (1904)*

Les voitures électriques bénéficient des évolutions techniques, et en 1900 elles sont à l'origine des premiers records d'autonomie en roulant sur 300 kilomètres sans recharge, ou de vitesse en dépassant les 100 km/h. À cette époque, le marché américain de l'automobile est composé à 38 % de voitures électriques, 40 % de voitures à vapeur et seulement 22 % de voitures à essence. C'est également à cette période que la domination du marché par les voitures à vapeur a commencé à décliner. Les voitures électriques sont alors pressenties pour leur succéder, car considérées comme plus fiables, plus simples à conduire et moins nauséabondes que les thermiques.



Figure I. 4 : *la voiture électrique « jamais contente » créée par Camille Jenatton en 1900*

Dans les années 1920, certains facteurs mèneront au déclin de la voiture électrique. On peut citer leur faible autonomie, leur vitesse trop basse, leur manque de puissance, la disponibilité du pétrole, et leur prix deux fois plus élevé que ceux à essence [2].

En 1972, Victor Wouk, le parrain du véhicule hybride construit la première voiture hybride, la Buick Skylark de GM (General Motors), **Figure I.5.**



Figure I. 5 : La Buick Skylark de GM (General Motors)

Société automobile General Motors lance un projet de recherche pour développer une nouvelle voiture électrique qui deviendra l'EV 1 et qui va être produite entre 1996 et 1998.

En 1997, Toyota lance la Prius, la première voiture hybride à être commercialisée en série. 18 000 exemplaires ont été vendus au Japon la première année et en 2006 Toyota a passé le cap des 500.000 unités vendues à travers le monde avec son célèbre véhicule hybride, **Figure I.6.**



Figure I. 6 : La Prius (Toyota 1997)

De 1997 à 2000, de nombreux constructeurs lancent des modèles électriques hybrides : la Honda EV Plus, la G.M. EV1, le Ford Ranger pickup EV, Nissan Altra EV, Chevy S-10 EV et le Toyota RAV4 EV [3].

Cependant à partir de 2000, la voiture électrique va ré-mourir à nouveau. En 2004, c'est la fin de l'EV1 ; GM va récupérer tous les véhicules EV1 pour les détruire, et ce malgré plusieurs mouvements de protestation ; Le constructeur fut accusé de céder au lobbying des sociétés pétrolières.

En décembre 2010, La Nissan LEAF (Leading, Environmentally Friendly, Affordable, Family car) est une voiture électrique à cinq places annoncée par Nissan en 2009, a été commercialisée au Japon et aux Etats-Unis et elle est devenu disponible dans l'ensemble de l'Europe depuis fin 2011.

A l'heure actuelle, l'ensemble des véhicules électriques proposés par les constructeurs disposent d'une autonomie comprise entre 70 km et 200 km. De nouvelles perspectives apparaissent toutefois avec l'utilisation de la pile à combustible qui permet d'augmenter considérablement l'autonomie (400 à 450 km pour le moment) pour arriver à des valeurs proches de celles des véhicules thermiques classiques.

Le prix de ces véhicules est encore difficile à établir car les quantités produites sont très faibles, souvent ce ne sont que quelques exemplaires qui sont fabriqués. En effet, le prix de l'alimentation constitue la part la plus importante du coût d'un véhicule électrique.

I.4. Les différents types de voiture électriques

Le terme « voiture électrique » désigne une voiture qui se mue grâce à l'énergie mécanique fournie par un moteur électrique. Ce moteur électrique est la plupart du temps alimenté par une batterie d'accumulateurs. Un terme plus spécialisé peut être utilisé pour désigner ce type de voitures électriques : les voitures électromotrices.

La terminologie « voiture électrique » peut également désigner une voiture à hydrogène ou une voiture hybride :

- Si le moteur électrique est alimenté par une pile à combustible fonctionnant à l'hydrogène, le terme « voiture à hydrogène » est plus adapté.
- Si le moteur électrique tire son énergie d'un moteur à combustion ou d'un générateur à combustion, il s'agit d'un véhicule « hybride » ou « hybride rechargeable ».

Tableau 1. 1 : Les différents types de voiture électriques.

Désignation	Type de moteur propulsant le véhicule	Source de l'énergie utilisée par le moteur
❖ Voiture électromotrice	Électrique	❖ Électricité stockée dans les batteries
❖ Voiture hybride	Électrique, couplé thermique	❖ Carburant consommé par le moteur thermique. ❖ Générateur pour les hybrides rechargeables. ❖ Électricité stockée dans les batteries.
❖ Voiture à hydrogène	Moteur électrique	❖ Électricité produite par la pile à combustible

I.4.1. Voiture hybride

Une automobile hybride est une automobile faisant appel à deux stockages d'énergie embarqués distincts pour se mouvoir, dont l'un de nature électrique.

L'architecture la plus répandue pour ce type de véhicule hybride associe le moteur électrique à un moteur thermique, généralement à essence.

La nature réversible de la partie motrice électrique permet la récupération d'une partie de l'énergie cinétique du véhicule par freinage régénératif. Le moteur électrique devient alors générateur et produit de l'électricité en fournissant un couple résistant aux roues, laquelle est stockée dans une batterie d'accumulateurs ou de super condensateurs.

On définit communément trois familles d'architectures hybrides : série, parallèle, et série-parallèles.

Selon l'architecture choisie, le véhicule hybride peut exploiter plusieurs fonctionnalités qui peuvent participer à la réduction de la consommation de carburant, ou à la récupération d'énergie électrique.

I.4.1.1. Principe hybride

Les véhicules hybrides disposant de plusieurs sources d'énergie pour assurer leur propulsion. Une propulsion hybride consiste à combiner un ou plusieurs moteurs électriques avec un moteur thermique. Lorsque le véhicule est immobile, les deux moteurs sont à l'arrêt. On distingue trois principaux modes de fonctionnement possibles. D'une façon très générale, on peut les résumer de la manière suivante :

a. Le mode thermique pur

Lorsqu' une accélération plus forte est demandée, le moteur thermique est démarré pour fournir le supplément de puissance et remplacer progressivement le moteur électrique, ce mode correspond à une propulsion intégralement assurée par le moteur thermique. Les performances en termes de consommation et de pollution sont alors similaires à celles d'un véhicule conventionnel.

b. Le mode électrique pur

La mise en mouvement de la voiture est assurée par le moteur électrique seul, jusqu'à une vitesse maximum variant entre 70 à 130 km/h .Ce mode correspond à une propulsion intégralement assurée par le moteur électrique. Le véhicule est alors dit ZEV (Zero Emission véhicule) et les performances en termes de dynamique et d'agrément de conduite sont similaires à celles d'un véhicule électrique. Ce mode conduit à plus ou moins long terme à la décharge des batteries.

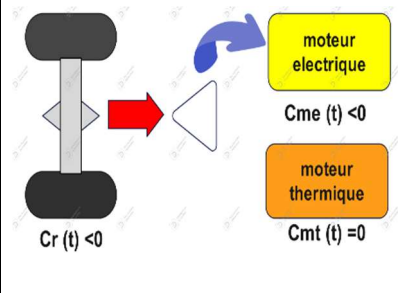
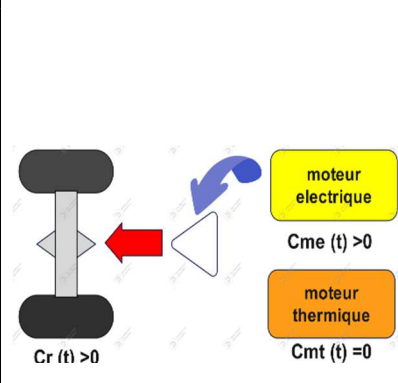
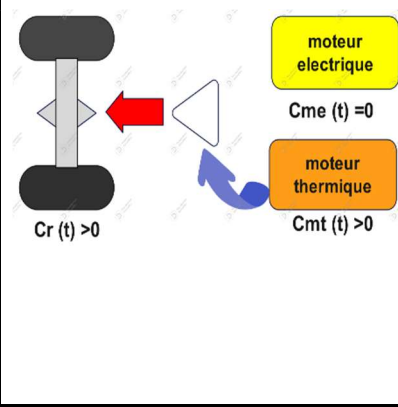
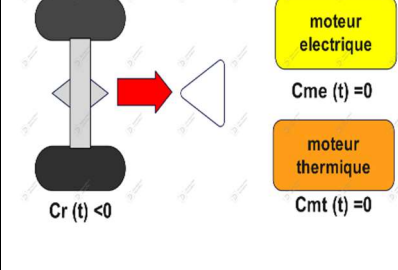
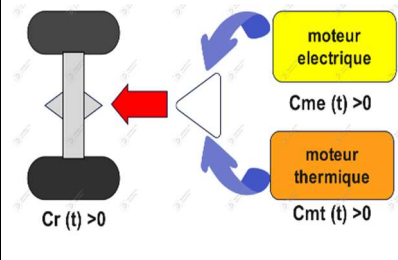
c. Le mode hybride

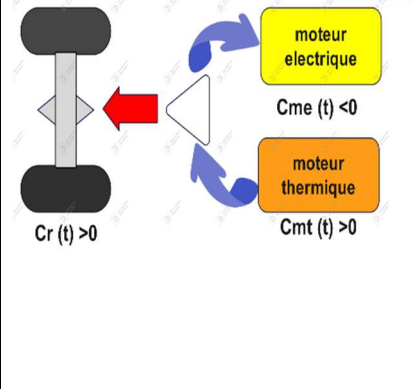
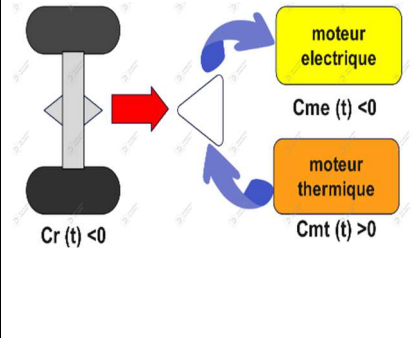
En cas de demande de puissance importante (forte accélération ou forte pente), les deux moteurs fonctionnent simultanément pour additionner leurs couples moteurs.

En traction, l'énergie nécessaire à la propulsion du véhicule peut être délivrée soit par les deux moteurs, soit par le moteur thermique seul. Le moteur électrique est alors utilisé pour recharger les batteries en roulant.

En phase de décélération ou de descente, le freinage régénératif permet au moteur/générateur de convertir une part de l'énergie cinétique en énergie électrique, rechargeant la batterie. Ce rôle de frein moteur peut être accru en forçant le moteur thermique à tourner sans injection de carburant, soulageant les freins mécaniques à friction. Celui-ci peut au contraire être arrêté pour réduire la consommation et la pollution, ce qui désactive son frein-moteur.

Tableau 1. 2 : principaux modes de fonctionnement de vehicule électrique.

mode électrique pur	freinage de véhicule : $Cr(t) < 0$		freinage récupératif en mode électrique pur: l'énergie cinétique du véhicule est récupérée par le moteur électrique pour recharger les batteries.
	traction de véhicule : $Cr(t) > 0$		traction en mode électrique pure: le moteur électrique fournit l'intégralité de l'énergie nécessaire à la propulsion du véhicule.
mode thermique pur	traction de véhicule : $Cr(t) > 0$		traction en mode thermique pur: Le moteur thermique fournit l'intégralité de l'énergie nécessaire à la propulsion du véhicule.
	freinage de véhicule : $Cr(t) < 0$		freinage en mode thermique pur : le moteur thermique n'étant pas réversible, l'intégralité de l'énergie cinétique du véhicule est dissipée sous forme de chaleur dans les freins.
			traction de véhicule en mode hybride: les deux moteurs participent à la propulsion du véhicule.

mode hybride	traction de véhicule : $Cr(t) > 0$		traction de véhicule en mode hybride: le moteur thermique fournit l'intégralité de l'énergie nécessaire a la propulsion du véhicule ainsi qu'un supplément qui est récupéré par le moteur électrique afin de recharger les batteries.
	freinage de véhicule : $Cr(t) < 0$		freinage récupératif en mode hybride: l'énergie cinétique du véhicule et l'énergie produite par le moteur thermique sont récupérées par le moteur électrique afin de recharger les batteries.

I.4.2. Voiture à hydrogène

La voiture à hydrogène est un véhicule électrique doté d'une pile à combustible produisant de l'électricité, associée à une batterie de faible capacité.

Dans un véhicule à hydrogène, c'est la source de puissance qui est hybride, la motorisation restant entièrement électrique. Un véhicule à hydrogène utilise donc une source secondaire d'énergie électrique réversible en puissance (fonctionnement en charge et en décharge). Les rôles de la source secondaire d'énergie sont :

- **Assister en puissance la pile à combustible**

La source secondaire fournit le complément de puissance lorsque la pile atteint sa puissance maximale (par exemple lors d'accélération du véhicule).

- **Récupérer l'énergie cinétique lors des freinages**

La récupération de l'énergie cinétique lors des phases de freinage permet d'économiser de l'hydrogène et d'augmenter l'autonomie du véhicule.

- **Introduire un degré de liberté dans la répartition des puissances**

L'hybridation permet de répartir la demande de puissance entre le système pile à combustible et la source secondaire d'énergie. Les points de fonctionnement du système PAC

peuvent ainsi être déplacés vers les zones de meilleurs rendements en utilisant des stratégies de commande adaptées, ce qui permet de réduire la consommation d'hydrogène.

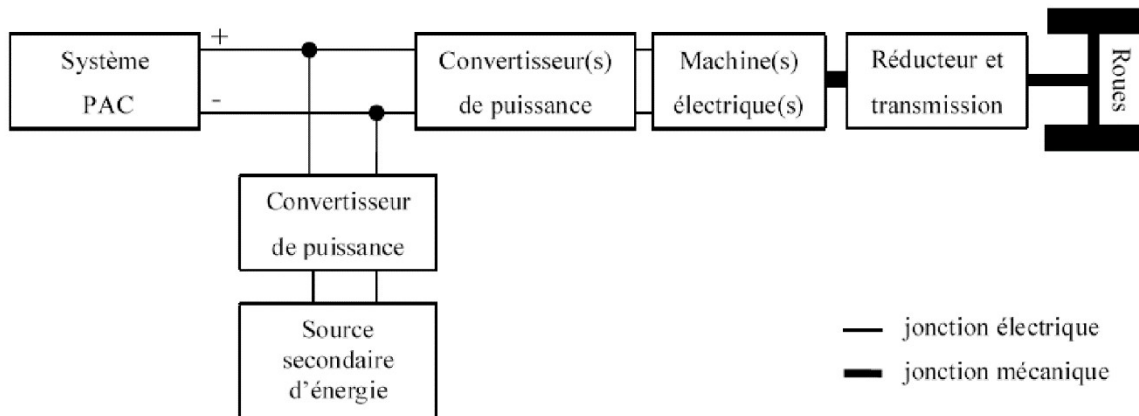


Figure I. 7 : Exemple d'architecture de véhicule à pile à combustible hybride

I.4.2.1. Principe de la pile à combustible à l'hydrogène :

Une pile à combustible est un dispositif de conversion d'énergie qui convertit l'énergie chimique directement en énergie électrique sans aucun processus thermique ou mécanique. Le principe de fonctionnement d'une pile à combustible est décrit par une réaction chimique. Cette réaction chimique est une oxydoréduction électrochimique. Elle fait réagir l'hydrogène et l'oxygène pour produire de l'électricité, de l'eau et de la chaleur, selon la réaction chimique globale suivante :

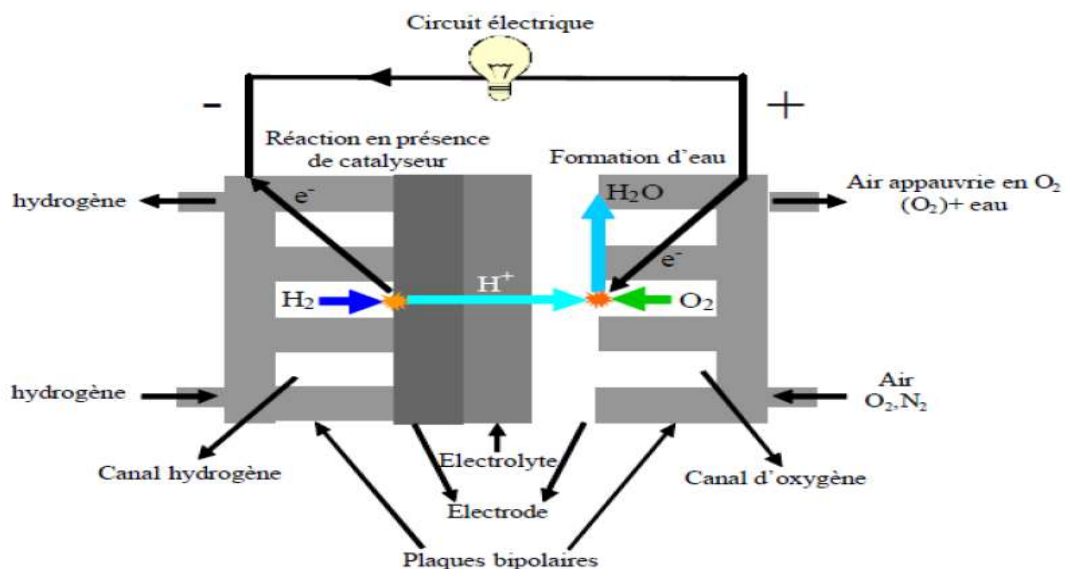
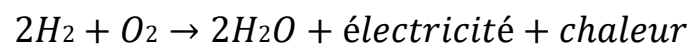


Figure I. 8 : Principe de la réaction catalytique dans l'électrode volumique

Chapitre I : Etat de l'art du véhicule électrique

Toute la difficulté est de fournir les composés nécessaires à la réaction. Pour l'oxygène, il suffit de le puiser dans l'air ambiant. C'est la production d'hydrogène qui pose problème. Il existe, en fait, deux solutions :

- l'hydrogène est stocké à bord du véhicule ;
- l'hydrogène nécessaire à la réaction est produit directement à bord du véhicule, via un reformeur, à partir d'essence ou de méthanol.

La principale différence entre une pile à combustible (PAC) et une batterie provient du fait qu'une pile à combustible fonctionne tant qu'elle est alimentée en combustible et en carburant, et ne nécessite pas de recharge électrique.

I.5. Architecture des véhicules électriques

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.

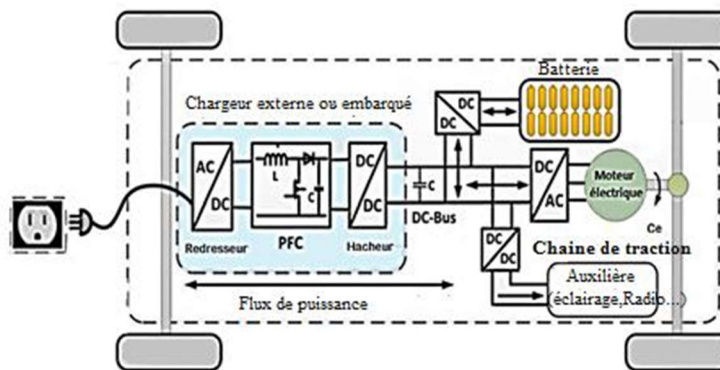


Figure I. 9 : Structure de la chaîne de traction dans un VE

La chaîne de traction d'un VE est plus simple que celle d'un véhicule thermique. Le choix et l'arrangement des composants qui constituent la chaîne de traction, ainsi que la gestion des flux d'énergie entre eux restent au stade de la recherche. Dans cette partie, on essaiera de présenter les composants nécessaires au fonctionnement du véhicule électrique.

I.5.1. Batterie

Les batteries sont des accumulateurs électrochimiques qui stockent l'énergie chimique qui peut être convertie en énergie électrique et comme il s'agit d'une source bidirectionnelle, l'énergie électrique peut être convertie en énergie chimique. En raison de leur énergie et de leur puissance spécifique, leur réversibilité et leur coût relativement faible (par rapport aux autres technologies), les batteries sont l'une des sources les plus attrayantes à utiliser dans les véhicules électriques et les véhicules électriques hybrides. Cependant, elles nécessitent encore des recherches approfondies sur des questions telles que la fabrication, la sécurité ou le recyclage [4].

I.5.2. Moteur

Il existe deux types de moteurs électriques : le moteur électrique à courant continu (CC ou DC) et le moteur électrique à courant alternatif (CA ou AC).

Le moteur électrique de traction très utilisé, depuis plus d'un siècle, le moteur électrique est souple, silencieux, ne pollue pas et s'adapte à toutes les situations.

De manière spécifique, le moteur électrique de traction doit répondre aux critères suivants :

- il doit pouvoir tourner et freiner dans les deux sens de rotation.
- il doit posséder un couple important à bas régime, ainsi qu'un bon rendement.

I.5.3. Super-condensateur

Les super-condensateurs ont été développés pour les applications de mémoire et ils s'ouvrent aujourd'hui à de nouvelles applications permettant ainsi de réduire la consommation d'énergie.

Les supercondensateurs sont un moyen très spécialisé de stocker l'électricité car ils peuvent produire une puissance beaucoup plus élevée que les batteries et condensateurs classiques.

I.5.4. Convertisseur réversible

C'est un onduleur de tension triphasé réversible régulé en courant. Il assure l'alimentation (en tension alternative) des moteurs-roues, le contrôle du courant absorbé par la machine synchrone à aimants permanents (donc du couple) à partir de sa commande, le contrôle

de la différence de vitesse entre les deux roues afin d'éviter les survitesses lorsqu'une des roues est en contact avec une zone glissante. Il y a un onduleur (variateur de vitesse) pour chaque moteur roue. Chaque variateur crée un système triphasé de courants sinusoïdaux pour alimenter les moteurs roues de façon indépendante. Les courants sont synchronisés avec les capteurs de position du rotor des machines. La consigne reçue par les deux variateurs est identique.

I.5.5. Hacheur DC/DC

Le convertisseur (DC/DC), ou hacheur, permet de fournir à partir d'une source de tension fixe une source de tension de valeur moyenne Réglable. La tension d'entrée du convertisseur (DC\DC) est la tension de la batterie, et celle de sortie est une tension régulée. Dans le cas où la batterie fournit de l'énergie, le courant circule de la batterie vers le moteur électrique .le hacheur est dit abaisseur de tension.

La présence d'un hacheur au niveau d'un véhicule hybride a deux usages essentiels :

IL est nécessaire pour adapter la tension de la batterie principale à celle des auxiliaires électronique utilisés (capture, régulateur,... etc.) .Sa capacité de fonctionnement autant qu'un élévateur pour alimenter l'onduleur de tension et un abaisseur pour assurer la recharge de la batterie. Permet de charger et décharger les super-condensateurs.

Le convertisseur est commandé de telle sorte que l'énergie de freinage soit systématiquement emmagasinée dans les super-condensateurs et que celle-ci soit systématiquement utilisée en premier lieu lors des accélérations qui proviennent après le freinage (super-condensateur charges).

I.5.6. Calculateur

La gestion de l'énergie du véhicule est assurée par un module appelé Boîtier de Gestion Energie (IBGE). Ce boîtier sera composé de plusieurs cartes électroniques ; la carte principale sera équipée d'un microcontrôleur dont le logiciel assurera toutes les stratégies à mettre en œuvre. Des cartes complémentaires de conditionnement permettent la mise en forme de certains signaux d'entrées et sorties gérés par la carte principale.

Le Boîtier de Gestion Énergie est en relation avec tous les organes du véhicule.

I.6. Infrastructures de recharge

L'infrastructure de recharge est nécessaire au développement de la voiture électrique. Cette infrastructure permet le ravitaillement du véhicule en électricité.

Les bornes de recharge sont des infrastructures qui permettent de recharger les véhicules électriques, au minimum il comporte un point de charge qui est réalisé par au moins une prise. L'infrastructure de recharge doit permettre aux utilisateurs de charger le véhicule pendant le trajet normal, et non imposer un stationnement spécifique (les VEs doivent être chargées lorsque vous gardez, et non pas lorsque vous vous arrêtez pour recharge) [5].

I.6.1. Les différents types pour les bornes de recharges

Pour recharger une voiture électrique, il existe trois types de recharges :

I.6.1.1. Recharge lente avec du courant alternatif à 3 kW

Elle se caractérise par un courant inférieur à 16 A, ce qui se traduit par une puissance de charge relativement faible (maximum 3,7 kW). Il faut alors 6 à 9 heures pour terminer une charge complète. La charge douce est toujours la plus respectée des batteries, contribue à améliorer sa durabilité et constitue le moyen le plus économique de recharger les véhicules électriques car elle ne nécessite pas d'abonnement spécifique [6].

I.6.1.2. Recharge accélérée toujours en courant alternatif mais à 22 kW

Le courant utilisé monte jusqu'à 32 A, ce qui permet d'augmenter la puissance électrique (22 kW maximum) et de charger le véhicule à 80% en environ 1 heure et 30 minutes [6].

I.6.1.3. Recharge rapide depuis du courant continu à 43 kW

La recharge rapide est une solution de confort qui peut être utile pour doter rapidement un véhicule, elle permet une charge à 80% en 30 minutes, avec une puissance supérieure à 22 kW (50 kW maximum) [7].

I.7. Quelques exemples de véhicules électriques

❖ Toyota Prius

Le groupe motopropulseur est connu sous le nom de Toyota Hybrid System (THS) qui réalise l'accouplement entre le moteur thermique, la génératrice électrique et le moteur électrique via un train planétaire. La deuxième génération de Prius (2004), présentée sur la **Figure I.10**, est dotée d'un nouveau motopropulseur innovant «Hybride Synergy Drive® » (HSD) qui dispose d'un convertisseur de tension qui augmente la tension de la batterie afin

Chapitre I : Etat de l'art du véhicule électrique

d'obtenir un meilleur rendement et plus de puissance avec une batterie plus petite et plus fiable.

La Prius produit 104 g/km de CO₂, et consomme 4,3 litres de l'essence pour 100 km.



Figure I. 10 : Toyota Prius (NHW20 depuis 2003)

- Architecture de la Toyota Prius

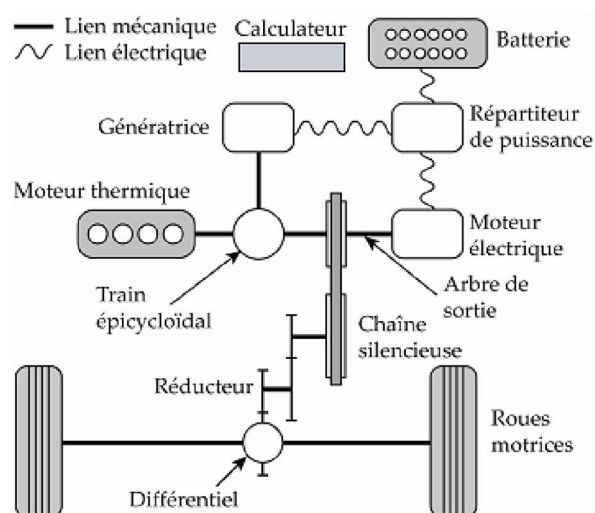


Figure I. 11 : Schéma de principe de la Toyota Prius II

❖ **Toyota Prius Hybride Plugin**



Figure I. 12 : Toyota Prius rechargeable

Elle est très proche de la Toyota Prius, à la différence près qu'elle est rechargeable sur une prise électrique, qu'elle fonctionne par défaut en mode électrique et qu'elle dispose d'une autonomie de 20km en tout électrique. Au-delà de la vitesse de 100 km/h ou lorsque la batterie est déchargée, le moteur à essence 1,8l de 98ch prend le relais du moteur électrique.

- *Architecture*

La Prius Hybride Rechargeable reprend l'architecture hybride intégrale de l'actuelle Prius, à cet avantage près qu'elle possède une batterie plus grosse qui peut se brancher et se recharger sur une prise de courant extérieure. La voiture possède un moteur à essence 1,8 litre VVT-i, un moteur électrique puissant, un générateur, une batterie hautes performances Lithium-ion et une électronique de puissance. Par l'intermédiaire d'un train épicycloïdal, un répartiteur collecte la puissance issue des moteurs thermique, électrique et du générateur, puis la redistribue selon les nécessités de fonctionnement. La transmission variable en continu électrique (E-CVT) est gérée sans liaison mécanique.



Figure I. 13 : Architecture Toyota Prius rechargeable

❖ Mercedes: Mild Hybride S400 blueHybrid

Commercialisée en 2009, la S400 BlueHYBRID possède un module hybride avec la fonction Stop/Start et la récupération de l'énergie au freinage. Le groupe peut fonctionner en mode tout électrique, et permet de récupérer puis stocker l'énergie cinétique libérée au freinage. La petite subtilité ajoutée par le constructeur allemand est la technologie Start/Stop, qui permet de couper automatiquement le moteur quand le véhicule est à l'arrêt et de le redémarrer dès que l'on enclenche une vitesse. La **Figure I.14** donne une photographie de la S400 BlueHYBRID et la **Figure I.15** le schéma d'implantation des différents éléments.



Figure I. 14 : Mercedes S400 Blue HYBRID

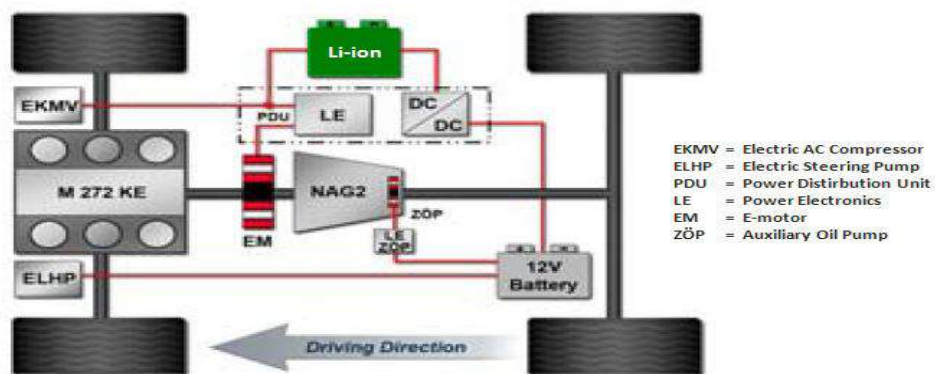


Figure I. 15 : Mercedes S400 BlueHYBRID

I.8. Conclusion

Ce premier chapitre a permis de présenter globalement le véhicule électrique et ces différents types. Nous avons également précisé d'écrire leurs principes de fonctionnement. Ainsi l'architecture du véhicule a été clairement définie et les différents organes qui constituent la chaîne de propulsion du véhicule électrique ont été listés. Pour chaque organe, on a précisé sa fonction et ses caractéristiques techniques à atteindre. Enfin nous avons cité quelques exemples de véhicules électriques récents.

Chapitre II

*Présentation et représentation des
différents organes d'un véhicule
hybride*

II.1. Introduction

Les particules fines et les gaz à effet de serre ont toujours été des barrières écologiques pour les véhicules conventionnels (moteurs à combustion interne), et avec les premières solutions, l'autonomie des véhicules électriques est généralement encore faible. Parce que la seule source d'énergie est stockée dans la batterie, en plus de mettre beaucoup de temps à se recharger, l'idée de l'électrification pour passer en hybride a été introduite en plus de la chaleur de l'électrification. L'objectif est de combiner les avantages des véhicules électriques (zéro pollution et récupération d'énergie), l'autonomie des batteries et les performances des véhicules thermiques.

Le but du chapitre 2 est de présenter les différentes parties d'un véhicule hybride, et les différents types d'hybrides qui existent.

II.2. Éléments constituant un véhicule hybride

Un véhicule hybride électrique est composé de deux organes de propulsion qui sont de nature différente ; en général il s'agit d'un moteur électrique et d'un moteur thermique. On associe ces deux moteurs des organes de stockage d'énergie correspondants : stockage d'énergie électrique (batterie, super-condensateurs) et stockage d'énergie fossile (réservoir de carburant), un calculateur de gestion d'énergie et des organes de transmission mécaniques.

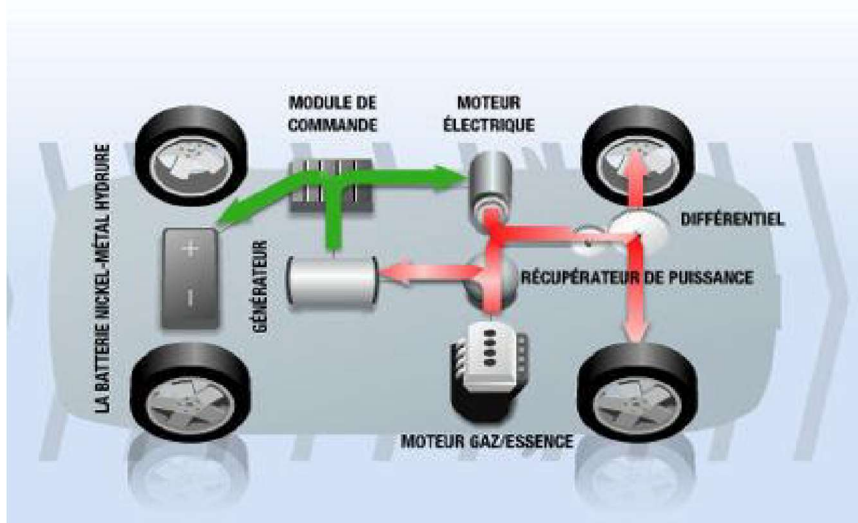


Figure II. 1: Schéma de principe d'une voiture hybride (Source Toyota)

II.3. Principales architectures de véhicules hybrides

Différentes architectures du véhicule sont définies selon le type d'agencement des différents composants de propulsion dans le véhicule hybride. Il existe trois architectures principales : les architectures série, les architectures parallèles et les architectures dites série-parallèles. La différence entre les trois architectures est la façon dont on regarde la nature des points de connexion entre les différentes chaînes de traction, appelés « nœuds ». Dans une architecture "série", les nœuds sont électriques et dans une architecture parallèle, ils sont mécaniques.

II.3.1. Architecture série (VHS)

Dans l'architecture série **Figure II.2**, la propulsion est intégralement assurée par un moteur électrique. Ce dernier peut être alimenté par les batteries et/ou par le groupe électrogène. Ce type d'architecture est souvent utilisé dans les bus hybrides. Une utilisation « naturelle » de ce type d'architecture consiste à augmenter l'autonomie d'un véhicule électrique par l'ajout d'un groupe électrogène. Cette architecture nécessite un moteur électrique relativement puissant car il assure à lui seul l'intégralité de la propulsion.

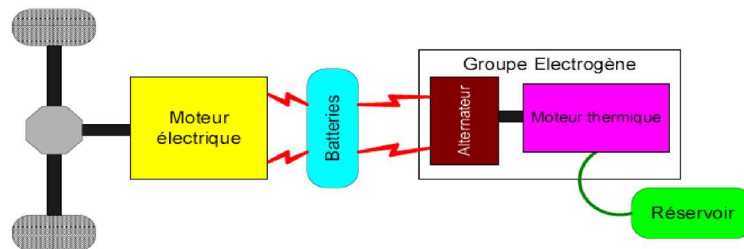


Figure II. 2 : Configuration Série

II.3.2. Architecture parallèle (VHP)

Ainsi, la VHP **Figure II.3** dispose de deux moteurs (moteur électrique et moteur thermique) fonctionnant en parallèle. Les deux moteurs sont utilisés séparément, fonctionnant en mode électrique pour résoudre les problèmes environnementaux des moteurs à combustion interne en ville, et fonctionnant en mode combustion pour assurer l'autonomie des véhicules électriques lors de longs trajets hors agglomération. Cette fois les points de liaison entre les différentes chaînes de traction sont mécaniques. Dans une configuration parallèle, les moteurs thermiques et électriques sont directement reliés à la boîte de vitesses, c'est-à-dire aux roues. Deux moteurs participent au mouvement du véhicule en parallèle, chacun transmettant une puissance mécanique aux roues.

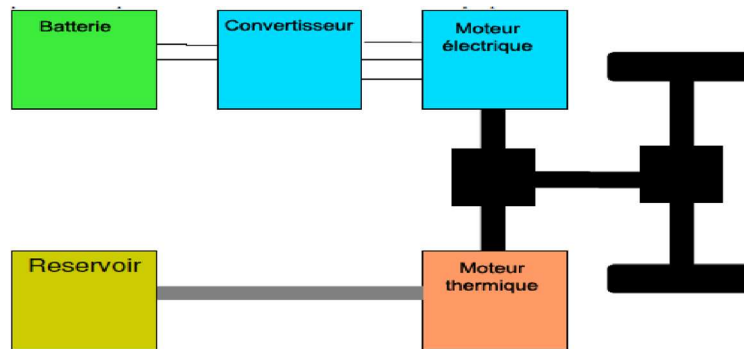


Figure II. 3 : Configuration Parallèle

L'objectif majeur de cette hybridation est de respecter la dynamique de la pile à combustible limitée principalement par le temps de réponse du compresseur d'air, de contrôler l'état de charge du dispositif de stockage (SC) et d'apporter ou d'absorber la puissance exigée par la charge.

Trois topologies de structures parallèles pour le système de puissance hybride PC/SCs peuvent être distinguées :

II.3.2.1. La structure parallèle directe (Figure II.4)

Consiste à interconnecter chaque source à la charge. Elle permet une prise en compte naturelle des contraintes de chaque source, et établit une corrélation naturelle entre puissance moyenne et état de charge des SC. Toutefois, elle nécessite un organe auxiliaire de démarrage. Par ailleurs, les spécificités de la PAC ne peuvent être totalement assurées car les pertes ohmiques des SCs induisent une transmission partielle des transitoires du courant de la charge vers la pile [8].

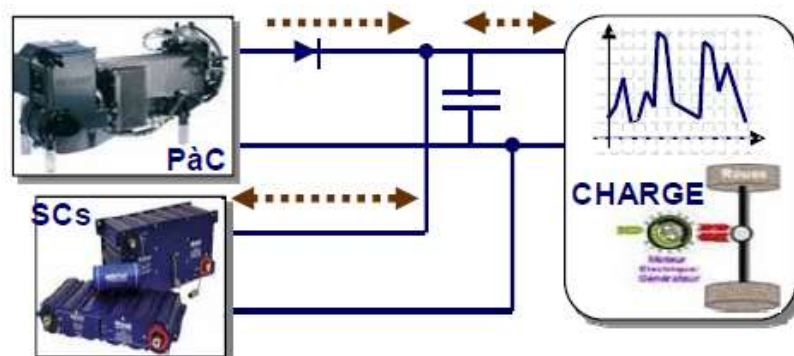


Figure II. 4 : Structure parallèle directe

II.3.2.2. La structure parallèle à deux convertisseurs (Figure II.5)

Consiste à associer à chaque source un convertisseur statique [9]. Elle permet de maîtriser parfaitement le flux de puissance de chaque source. Toutefois, ses inconvénients sont les inévitables pertes associées à chaque convertisseur statique et un coût plus élevé. En particulier, la puissance délivrée par la source permanente (PC) est continuellement diminuée par les pertes de son convertisseur.

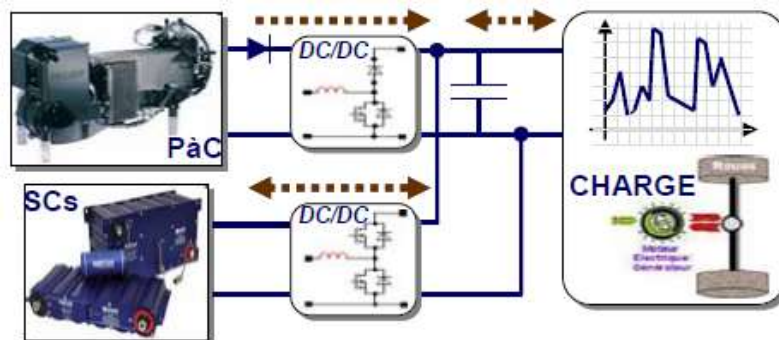


Figure II. 5 : Structure parallèle à deux convertisseurs

II.3.2.3. La structure parallèle à un convertisseur (Figure II.6)

Consiste à connecter directement la PaC à la charge et à n'utiliser qu'un seul convertisseur « d'interface » pour régler les flux de puissance [10]. Ce convertisseur n'est utilisé que de manière intermittente, puisqu'il assure l'adaptation des grandeurs électriques (tension / courant) entre les SCs et la charge. Ses avantages principaux sont la simplicité et la réduction des pertes et des coûts liés aux interfaces de gestion de puissance.

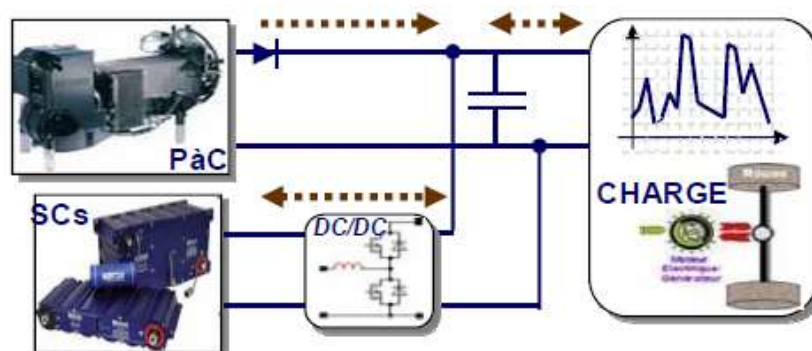


Figure II. 6 : Structure parallèle à un convertisseur

II.3.3. Le sous-système électrique

II.3.3.1. La machine électrique

Le principe général de fonctionnement des machines électriques repose sur l'interaction de deux champs magnétiques. L'un est généré par la partie fixe de la machine (stator) et l'autre par la partie mobile (rotor). Il existe une grande quantité de connaissances pratiques qui nous permettent de classer les machines électriques en différentes catégories, et pour celles utilisées dans le secteur automobile, les points suivants doivent être mentionnés.

a. Les machines à courant continu

Bien que leur usage soit en très nette régression, alimentées directement par le réseau de bord en courant continu sous 12V, elles restent très utilisées dans le domaine automobile pour assurer l'entraînement d'organes auxiliaires (ventilateur, lève vitre, essuie-glace, ...).

Jusque dans les années 2005 [11], elles ont été utilisées pour assurer la traction des véhicules électriques. Toutefois, les principaux inconvénients que sont l'usure des balais voire du collecteur qui nécessite un entretien périodique, et leur faible puissance spécifique ont conduit les concepteurs à développer des machines sans balais dit moteur « Brushless ».

b. Les machines asynchrones

Ces machines sont très largement répandues et représentent environ 80% du marché mondial des machines électriques. Leur simplicité de conception en fait un matériel très robuste qui ne demande que peu d'entretien. On les rencontre sur un très large spectre de puissance de quelques W (moteurs asynchrones monophasés) à plusieurs MW pour assurer la propulsion de sous-marins par exemple. Dans le domaine automobile, seule la société Tesla utilise cette technologie pour propulser son véhicule électrique nommé model "S" [12].

Aujourd'hui, bon nombre de constructeurs automobiles et d'équipementiers étudient ce type de machine qui pourrait à moyen terme remplacer les technologies de machines synchrones à aimants permanents ou à rotor bobiné [12].

c. Les machines synchrones à aimants permanents

Ce sont les plus répandues dans le domaine de la traction automobile. Ces dernières années un regain d'intérêt s'est porté sur les machines à aimants permanents car elles présentent des rendements particulièrement élevés [13].

L'augmentation du prix des terres rares qui entrent dans la composition des aimants, imposée par la Chine qui en maîtrise plus de 90% de la production, a amené les constructeurs

à étudier d'autres types de machines électriques. En particulier, les machines synchrones à rotor bobiné, dont le principe est utilisé depuis quelques dizaines d'années pour l'application des alternateurs, a fait l'objet d'évolutions récentes. Un onduleur s'est substitué au redresseur afin de rendre ces machines réversibles pour assurer les fonctions de Stop and Start. Des développements se poursuivent actuellement pour en augmenter la puissance spécifique en jouant sur la tension (passage de 12V à 48V) et atteindre une puissance maximale d'une dizaine de kW pour offrir aux clients de nouvelles prestations accessibles aux MHEV [13].

d. Les machines à réluctance variable

Si elles présentent un grand intérêt vis à vis de leur coût de production, la complexité de la commande, leurs fortes ondulations de couple et leurs émissions sonores n'ont pas permis d'envisager pour l'application automobile leur industrialisation. Des progrès techniques sont encore nécessaires pour passer du stade prototype à la commercialisation [14].

II.3.3.2. Les convertisseurs

A. Hacheur DC/DC

Les composants communs aux VE à base de PAC sont les convertisseurs DC/DC. Ces derniers sont utilisés principalement pour augmenter ou diminuer la tension des différents composants en fonction de la tension des autres composants. Les sources hybrides étudiées disposent soit de deux convertisseurs dans le cas des sources hybrides électriques PAC/Batterie et PAC/SC, soit de trois convertisseurs pour la source PAC/batterie/SC, cela grâce aux tensions de fonctionnement différentes des sources embarquées. Les convertisseurs sont utilisés principalement pour adapter leur tension à la tension du bus DC. En effet, il y a un certain nombre d'avantages à inclure des convertisseurs dans une source hybride. Premièrement, l'introduction d'un convertisseur DC/DC contrôlable est un moyen direct de gestion de l'énergie des systèmes. Deuxièmement, la capacité d'augmenter ou diminuer la tension entre les sources et la charge donne plus de degrés de liberté à la conception de la source hybride. Dans le paragraphe suivant, nous allons parler du mode de fonctionnement des convertisseurs boost et Buck/boost, utilisés pour les architectures des sources hybrides :

A.1. Convertisseur boost à la sortie de la PAC

Malgré les avantages des PAC, certaines problématiques sont toujours en attente, en particulier sur la faible tension produite en sortie de cette dernière. En raison de la faible tension, un convertisseur DC/DC est indispensable afin d'élever cette tension jusqu'au niveau de la tension du bus DC. **Figure II.7** présente la topologie du convertisseur boost de la PAC.

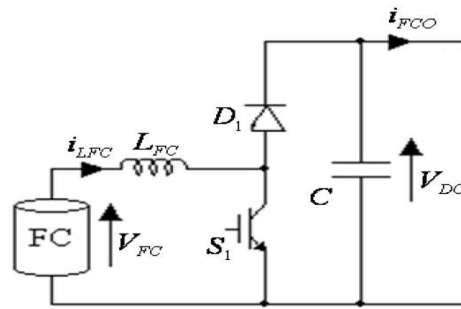


Figure II. 7 : Convertisseur Boost de la PAC

A.2. Convertisseur buck/boost pour le système de stockage

Le choix d'utiliser un convertisseur bidirectionnel est motivé par la nature réversible du système de stockage. La notion de réversibilité concerne seulement les grandeurs de courant et de puissance. En outre, la tension aux bornes du système de stockage est toujours positive.

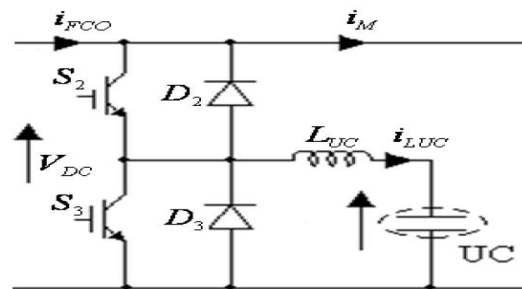


Figure II. 8 : Convertisseur Buck/Boost

II.3.3.3. Batteries

La batterie est un système de stockage d'électricité sous forme chimique, pouvant fonctionner de manière réversible (en courant pas en tension), caractérisée par sa capacité et son énergie massique. L'énergie chimique stockée dans chaque pile est convertie directement en énergie électrique lorsque les bornes de la batterie sont connectées à un consommateur électrique. La Figure II.9 représente la vue interne d'une batterie utilisée dans les véhicules électriques [15].

Le principe de fonctionnement de celle-ci est que la réaction chimique entre les électrodes et l'électrolyte provoque une oxydoréduction. Dans ce cas, l'électrode négative subit une oxydation, c'est-à-dire que la réaction chimique libère des électrons, tandis que l'électrode positive subit une réduction, autrement dit elle absorbe des électrons. Ce déséquilibre des charges électriques génère la F.E.M (Force électro Motrice) de l'accumulateur [15].

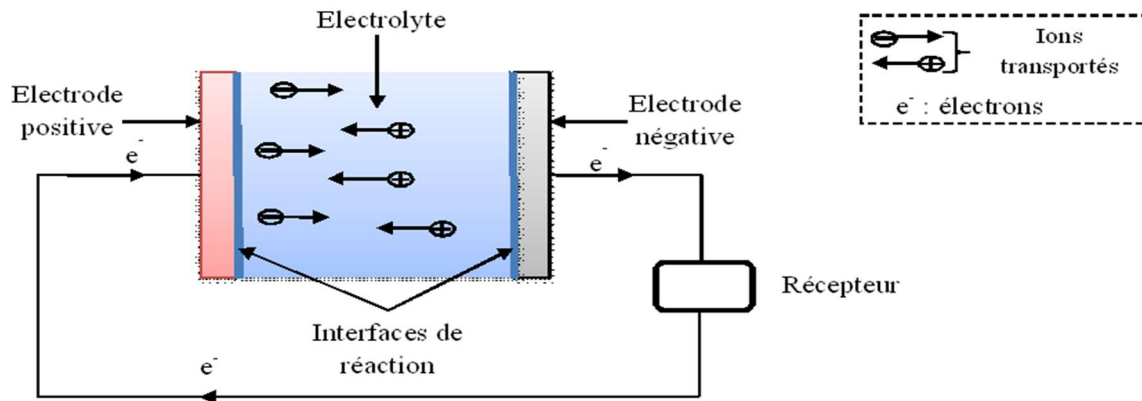


Figure II. 9 : Principe d'un accumulateur électrochimique

a. Caractéristiques des batteries

Un accumulateur, quelle que soit la technologie utilisée, est pour l'essentiel défini par les paramètres suivants [16]:

- La densité d'énergie massique (ou énergie spécifique), en Wh/kg correspond à la quantité d'énergie stockée par unité de masse d'accumulateur ;
- La densité d'énergie volumique, en Wh/l correspond à la quantité d'énergie stockée par unité de volume d'accumulateur ;
- La densité de puissance massique, en W/kg, représente la puissance que peut délivrer l'unité de masse d'accumulateur ;
- Le nombre de cycles (un cycle correspond à une charge et une décharge), caractérise la durée de vie de l'accumulateur, c'est-à-dire le nombre de fois où il peut restituer le même niveau d'énergie après chaque nouvelle recharge ;
- La tension nominale dépend du nombre d'éléments ;
- La capacité de stockage, notée Q, représente la quantité d'énergie disponible (à ne pas confondre avec la capacité électrique) ; elle s'exprime en Ah ;
- Le courant maximal qu'elle peut fournir pendant quelques instants, ou courant de crête en ampères.

b. Batteries Plomb-Acide

Inventée en 1859, est à la fois la batterie la plus ancienne et la plus utilisée des accumulateurs électrochimiques. Sa tension par élément est de 2V. Sa version pour automobile est beaucoup plus récente (1970-1975). Aujourd'hui, la batterie au plomb est la technologie la plus répandue dans les applications automobiles car elle est la plus mature, la moins onéreuse

et la plus facile à recycler. Cependant, cette technologie présente une énergie massique faible, elle est polluante et son recyclage n'est pas rentable.

Elle tend donc à disparaître compte tenu des contraintes environnementales de plus en plus drastiques [17].

c. Batteries Nickel-Cadmium (Ni-Cd)

Largement utilisées au XXe siècle, souffrent en partie des mêmes problèmes que celles au plomb en termes de performances. Et la toxicité du cadmium contenu dans ces batteries fait que leur usage est très encadré et que leur application risque d'être limitée [18].

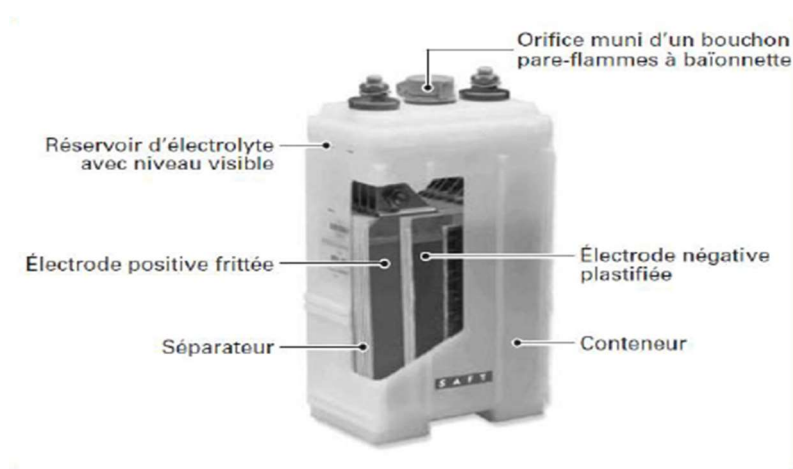


Figure II. 10 : *Vue éclatée d'une batterie nickel-cadmium Ni-Cd industrielle*

La tension nominale d'un élément accumulateur de ce type est de 1,2 V. Ce type d'accumulateur possède un effet mémoire, ce qui impose leur stockage dans un état déchargé (0,6 V). La fin de charge est caractérisée par une variation de la tension de charge (dv/dt) négative. C'est ce seuil qui est détecté par les chargeurs automatiques de qualité pour arrêter la charge. Par rapport au Ni-MH, le Ni-Cd peut supporter des pointes de courant en décharge plus importantes (de l'ordre de 100 fois) mais sa décharge naturelle est plus rapide que celle du Ni-MH. En outre, le cadmium est très polluant. Ce type d'accumulateur permet un nombre de cycles charge/décharge plus important que les accumulateurs Li-ion et Ni-MH (durée de vie supérieure).

★ Points faibles

- Faible densité énergétique ;
- Autodécharge assez rapide (20% / mois) ;
- Problème de l'effet mémoire ;

- Contient des substances dangereuses (6% de Cd) ce qui implique qu'il doit être collecté en fin de vie pour recyclage ;
- Coût d'achat plus élevé que la technologie au plomb.

★ **Points forts**

- Charge simple et rapide, même après une longue période de stockage, et notamment à froid.
- Grande durée de vie en nombre de cycles de charge et de décharge.
- Conserve ses performances à basse température et ne vieillit pas prématurément à haute température.
- Résistance interne très faible.
- Stockage aisé, quel que soit son niveau de charge.

d. Batteries Nickel-Hydrure métallique (Ni-MH)

Sont largement utilisées à l'heure actuelle dans les VEH, et sont réputées avoir une longue durée de vie et une meilleure densité énergétique que les deux premières [18].

L'accumulateur Ni-MH diffère de l'accumulateur Ni-Cd au niveau de l'électrode négative dont le matériau actif est, au lieu de cadmium, de l'hydrogène absorbé dans un alliage métallique.

Un gain significatif en énergie volumique favorise le développement du système Ni-MH au détriment du système Ni-Cd, d'autant plus que l'énergie spécifique de l'électrode à base d'hydrure métallique est plus élevée que celle d'une électrode à base de cadmium. Cependant, l'accumulateur Ni-MH est le siège d'une autodécharge comparable à celle de l'accumulateur Ni-Cd, et est par conséquent adapté aux régimes rapides en charge comme en décharge. Il en résulte, en régime permanent, une densité de puissance comparable à celle des accumulateurs au plomb ou Ni-Cd (au mieux 200 W/kg). Par contre, l'accumulateur Ni-MH est plus adapté en régime impulsionnel et fait donc l'objet d'une utilisation dans les véhicules hybrides.

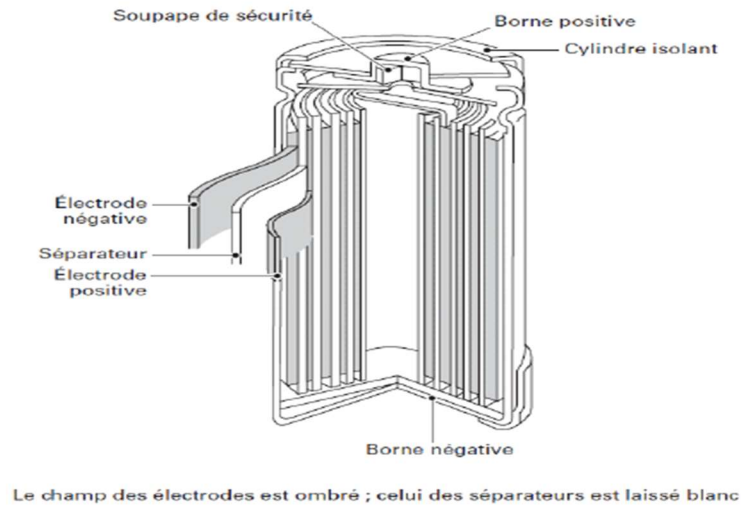


Figure II. 11 : *Accumulateur nickel-hydrure métallique Ni-MH en géométrie cylindrique*

★ **Points forts**

- Contient sensiblement plus d'énergie que le nickel-cadmium ;
- Peu sensible à l'effet mémoire ;
- Simple à stocker et à transporter ;
- Ne contient pas de cadmium.

★ **Points faibles**

- Ne supporte pas le dépassement de charge
- Détection de fin de charge difficile (Δv très faible)
- Durée de vie plus faible que le nickel-cadmium en nombre de cycles

e. Batteries au Lithium-ion

Un accumulateur lithium est un accumulateur électrochimique dont la réaction électrochimique fait intervenir le lithium. Au début du XXI^e siècle, cet accumulateur est celui qui offre la plus forte énergie spécifique (énergie/masse) et la plus grande densité d'énergie (énergie/volume). Par exemple, l'automobile Opportunity possède une batterie au lithium-ion rechargeable avec ses panneaux solaires. Il a fonctionné pendant de nombreuses années malgré un froid intense à - 100°C sur la planète Mars.

Il existe plusieurs sortes d'accumulateurs au lithium :

- L'accumulateur lithium-métal, où l'électrode négative est composée de lithium métallique (matériau qui pose des problèmes de sécurité) ;

- Les accumulateurs lithium-ion, où le lithium reste à l'état ionique grâce à l'utilisation d'un composé d'insertion aussi bien à l'électrode négative (généralement en graphite) qu'à l'électrode positive (dioxyde de cobalt, manganèse, phosphate de fer) ;
- Les accumulateurs lithium-polymère sont une alternative aux accumulateurs lithiumion ; ils délivrent un peu moins d'énergie, mais sont beaucoup plus sûrs.

II.3.3.4. Super-condensateurs

Les SCs connus sous le nom de condensateurs électriques à double couche. Ce sont des sources électrochimiques qui stockent l'énergie électrique qui est directement convertie et donc avec une haute efficacité [19], [20]. Cette source présente une puissance spécifique très élevée mais avec une énergie spécifique faible. Les SCs sont une alternative aux batteries dans les véhicules hybrides et sont parfois utilisés en complément d'un bloc batterie [21], [22]. Les SC sont analogues tant en fonctionnement qu'en performance aux condensateurs conventionnels qui sont couramment utilisés pour filtrer et mettre à niveau les petits circuits électroniques.

a. Principe de fonctionnement des SCs

Les SC sont des dispositifs électroniques qui utilisent la séparation de charge ou des champs électriques pour stocker l'énergie électrique. Une cellule SC se compose de deux électrodes (généralement du charbon actif de grande surface) reliées iniquement par un électrolyte composé d'ions positifs et négatifs solubilisés dans un solvant comme l'eau. Lorsqu'une tension est appliquée à la cellule, une double couche est générée à chaque interface électrode-électrolyte, où une couche se trouve à la surface de l'électrode et l'autre couche est formée par les ions électrolyte solubilisés ayant une polarité opposée. Les deux couches sont séparées par les molécules de solvant adsorbées à la surface de l'électrode. En raison de la grande surface de l'électrode et de la distance extrêmement mince entre les deux couches, il est possible d'obtenir une grande capacité (des milliers de Farads par cellule), permettant aux SCs de stocker des milliers de fois plus d'énergie que les condensateurs électrolytiques classiques.

Lorsqu'une tension est appliquée à travers les plaques du SC, ou les bornes, les plaques se chargent en sens inverse. La plaque connectée à la borne négative de la source de tension accepte les électrons et se charge négativement tandis que la plaque connectée à la borne positive de la source de tension perd des électrons, se charge donc positivement. Le principe de base du condensateur à double couche électrique est illustré dans la **Figure II.12**. L'isolant diélectrique empêche le transfert d'électrons entre les deux électrodes, ce qui entraîne une

séparation de charge et un champ électrique. En présence de ce champ électrique, le diélectrique devient polarisé, c'est-à-dire que ses ions s'alignent avec le champ créé par les deux plaques.

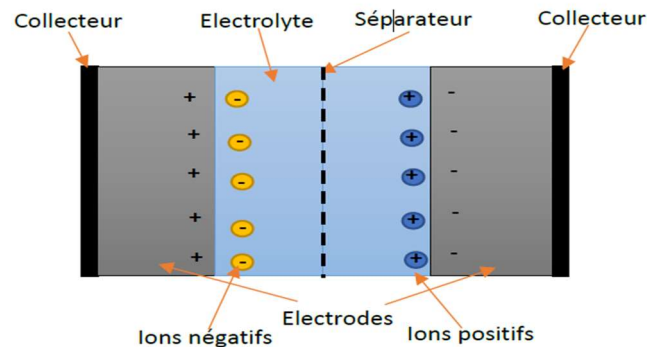


Figure II. 12 : Composition interne d'un SC.

II.3.3.5. pile à combustible

a. Description

Une pile à combustible est un générateur d'énergie électrique. Elle transforme directement l'énergie chimique du combustible en énergie électrique. De plus, le courant électrique est produit tant que la pile est alimentée conjointement en combustible (hydrocarbures, alcools, biomasse, gaz naturel, hydrogène) et en comburant (oxygène de l'air). C'est ce qui la différencie des batteries, accumulateurs et autres piles, où se trouve stockée sous forme chimique une quantité limitée d'énergie électrique et qui doivent soit être rechargés lorsque c'est possible (batterie de véhicule), soit être remplacés (piles pour poste de radio).

b. Types de piles à combustible

La classification des piles à combustible se fait généralement selon la nature de l'électrolyte car celui-ci détermine, d'une part, la température à laquelle la pile fonctionne, d'autre part, le type d'ion assurant la conduction ionique. La classification repose essentiellement sur :

- La nature de la membrane : liquide ou solide
- La température de fonctionnement de la pile : basse (60 °C-250°C) ou haute (600 °C-1000 °C).

Tableau 2. 1 : Différents types de piles à combustible.

pile combustible	électrolyte	température (°C)	combustible	comburant	domaine d'utilisation/gamme de puissance
AFC	alcaline KOH,NaOH	60-120	Hydrogène	air ou oxygène	<ul style="list-style-type: none"> ● Spatial Défense, ● Equipements portables
PEMFC	membrane à échange de proton	60-120	Hydrogène	air ou oxygène	<ul style="list-style-type: none"> ● Spatial ● transport, ● Stationnaire, ● Equipement portable
DMFC	membrane à échange de proton (H ₂ PO ₄)	60-120	Méthanol	air ou oxygène	<ul style="list-style-type: none"> ● Transport, ● Equipement portable
PAFC	acide phosphorique H ₃ PO ₄	150-220	Hydrogène, Gaz naturel, Méthanol	air	<ul style="list-style-type: none"> ● Stationnaire, ● Cogénération ● transport
MCFC	Sel de Carbonate fondu liquide	600-800	Hydrogène, Gaz naturel	air	<ul style="list-style-type: none"> ● Stationnaire, ● Transport, ● Cogénération, ● production décentralisée.
SOFC	oxyde de zirconium stabilisé ZrO ₄ et Y ₂ O ₃	750-1050	Hydrogène, Gaz naturel, Méthanol	air	<ul style="list-style-type: none"> ● Stationnaire, ● cogénération

c. Architecteur de la pile à combustible

La pile à combustible a besoin d'un ensemble de conditions pour produire de l'énergie électrique: elle doit être alimentée en hydrogène et en air, la membrane doit être en permanence humidifiée, et la chaleur produite doit être évacuée. Les composants auxiliaires ont pour rôle d'assurer le bon fonctionnement de la pile à combustible. L'ensemble composé de la pile à combustible et de ses composants auxiliaires est appelé système pile à combustible.

Les systèmes de piles à combustibles sont généralement conçus spécifiquement pour une application en particulier. Il existe donc de nombreuses architectures possibles. Une architecture classique est donnée **Figure II.13**.

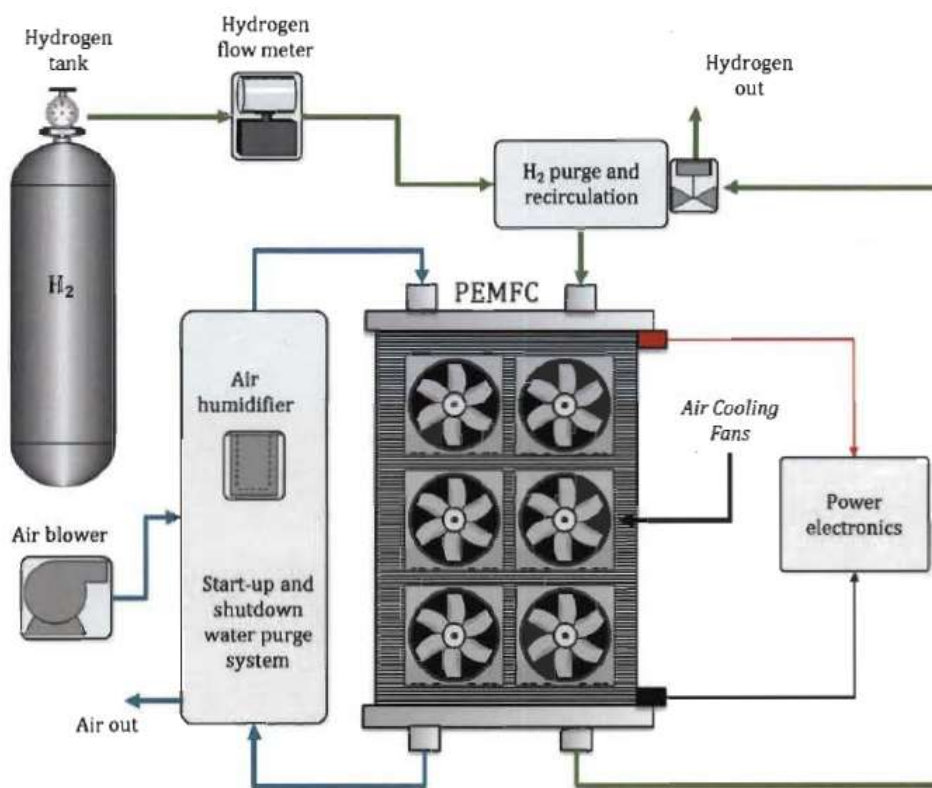


Figure II. 13 : Architecture d'un système à pile à combustible

Quatre circuits principaux composent un système PAC :

c.1. Le circuit d'hydrogène (circuit fermé)

Il alimente l'anode en hydrogène gazeux. L'hydrogène non consommé à la sortie de la PAC peut être réinjecté à l'entrée de celle-ci par l'intermédiaire d'une pompe de recirculation.

c.2. Le circuit d'air (circuit ouvert)

Généralement, pour alimenter la pile à combustible en oxygène, un compresseur injecte de l'air à la cathode.

c.3. Le circuit de refroidissement

Le circuit de refroidissement est une partie essentielle du système pile à combustible. La chaleur produite par la PAC peut représenter plus de 50% des pertes de puissances pour des courants élevés. De plus, la différence de température limitée entre la pile à combustible (80 C° environ) et l'air ambiant ne favorise pas les échanges thermiques et impose l'utilisation de larges échangeurs de chaleurs. Ceci représente une contrainte technique importante dans des applications automobiles.

c.4. Le circuit d'eau

L'humidification des membranes se fait par les gaz entrants (air et hydrogène) via le circuit d'eau .L'eau contribue également au refroidissement de la pile à combustible lors de son passage dans l'échangeur de chaleur.

II.4. Conclusion

Après une brève introduction aux véhicules hybrides, ce second chapitre a pu définir clairement l'architecture du véhicule hybride et énumérer les différents organes qui composent le groupe motopropulseur d'un véhicule hybride. Nous avons défini les fonctions et les caractéristiques techniques qui doivent être réalisées pour chaque pièce.

Chapitre III

Modélisation des différents organes d'un véhicule hybride

III.1. Introduction

Le véhicule automobile est un système physique complexe car il est composé d'une multitude d'organes. Sa dynamique n'est pas facile à modéliser ni à optimiser. La conception de nouveaux véhicules ou l'étude des phénomènes régissant leur comportement sont liées à la modélisation des sous-systèmes qui les composent.

L'objectif de ce chapitre est de proposer un modèle de véhicule hybride. Vu la complexité du système nous étudierons le moteur électrique et en particulier le moteur synchrone à aimant permanent, aussi nous présenterons la modélisation des sources énergétique et, la pile à combustible, le super condensateur, la batterie et les convertisseurs statiques. La modélisation et la simulation ont été effectuées sous le logiciel MATLAB.

III.2. Modélisation de la machine

Les entrées pour le système (machine synchrone) sont les trois tensions de phase (qui sont contrôlées pour obtenir le courant désiré) et le couple résistant imposé par le compresseur d'air. En sortie, la grandeur utile est la vitesse de rotation du moteur.

III.2.1. Mise en équation de la machine synchrone dans le repère triphasé (a-b-c)

Pour établir des relations simples entre les tensions d'alimentation du moteur et ces courants, nous considérons que le modèle de la machine synchrone **Figure III.1** suivant :

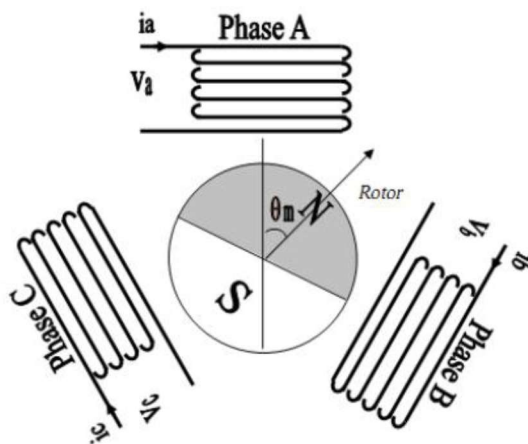


Figure III. 1 : Schéma équivalent d'une MSAP dans le repère (a-b-c)

III.2.1.1. Equations électriques

Les équations électriques dans un repère fixe lié au stator sont décrites par :

$$\begin{cases} V_a = R_s * i_a + \frac{d\varphi_a}{dt} \\ V_b = R_s * i_b + \frac{d\varphi_b}{dt} \\ V_c = R_s * i_c + \frac{d\varphi_c}{dt} \end{cases} \quad (III. 1)$$

Avec :

R_s: Résistance d'un enroulement statorique,

i_a i_b i_c: Les courants des phases statoriques a, b, c,

φ_a φ_b φ_c : Les flux produits par les phases statoriques respectivement a, b, c,

V_a V_b V_c: Les tensions des phases statoriques.

Sous forme matricielle:

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_a \\ \varphi_b \\ \varphi_c \end{bmatrix} \quad (III. 2)$$

III.2.1.2. Equations du flux

En vertu de l'hypothèse d'une répartition spatiale sinusoïdale de l'induction, les flux induits par l'aimant dans les trois phases statoriques ' a, b, c ' sont donnés par :

$$\begin{cases} \varphi_{fa} = \varphi_{max} \cdot \cos(\theta) \\ \varphi_{fb} = \varphi_{max} \cdot \cos(\theta - 2\pi/3) \\ \varphi_{fc} = \varphi_{max} \cdot \cos(\theta - 4\pi/3) \end{cases} \quad (III. 3)$$

L'expression du flux total dans la phase 'a' est donnée par :

$$\varphi_{aa} = \varphi_{aa} + \varphi_{ba} + \varphi_{ca} + \varphi_{fa} = l_s i_a + M_s (i_b + i_c) + \varphi_{fa} \quad (III. 4)$$

Du fait que la machine est équilibrée à neutre isolé, on a : (i_a+i_b+i_c=0), d'où : L'expression du flux dans la phase 'a' se réduit à :

$$\varphi_a = (l_s - M_s) i_a + \varphi_{fa} = l_{sc} i_a + \varphi_{fa} \quad (III. 5)$$

l_{sc}: L'inductance cyclique d'un enroulement statorique,

l_s : L'inductance propre d'une phase statorique,

M_s : Mutuelle inductance entre phases du stator.

Par conséquent, les expressions des flux dans les deux autres phases se déduisent par :

$$\begin{cases} \varphi_b = l_{sc}i_b + \varphi_{fb} \\ \varphi_c = l_{sc}i_c + \varphi_{fc} \end{cases} \quad (III. 6)$$

En remplaçant les expressions des flux dans le système des tensions équation (III.1), on obtient :

$$\begin{cases} V_a = R_s i_a + l_{sc} \frac{di_a}{dt} + \frac{d\varphi_{fa}}{dt} \\ V_b = R_s i_b + l_{sc} \frac{di_b}{dt} + \frac{d\varphi_{fb}}{dt} \\ V_c = R_s i_c + l_{sc} \frac{di_c}{dt} + \frac{d\varphi_{fc}}{dt} \end{cases} \quad (III. 7)$$

III.2.1.3. Equations mécaniques

L'équation mécanique de la machine s'écrit :

$$J \frac{d\omega_r}{dt} = C_{em} - C_r - f \cdot \omega_r \quad (III. 8)$$

Avec :

ω_r : Vitesse de rotation de la machine,

J : Moment d'inertie,

C_{em} : Couple électromagnétique,

C_r : Couple résistant,

f : Coefficient de frottement,

P : Nombre de paires de pôles.

On remarque que les équations obtenues dans le repère (a-b-c) sont fortement non linéaires et couplées, elles sont en fonctions de la position du rotor θ .

Pour résoudre les équations, la plupart des travaux dans la littérature font appel à l'utilisation de la transformation de Park. Cette transformation, appliquée aux variables réelles (tensions, courants et flux), permet d'obtenir des variables fictives appelées les composantes (d-q) ou biphasé. Ceci peut être interprété comme étant une substitution des enroulements immobiles de phases du système réel (a, b, c) en enroulements orthogonaux d'axes (d-q) tournant à une vitesse ω_r par rapport au stator **Figure III.2**. Ce changement de repère rend les équations dynamiques de la machine plus simples ce qui facilite leur étude et leur analyse.

III.2.2. Transformation de Park

La transformation de Park consiste donc à transformer le système d'enroulements triphasés statoriques d'axes en un système équivalent à deux enroulements biphasés sur les axes en raison la conservation de la F.m.m et de la puissance instantanée.

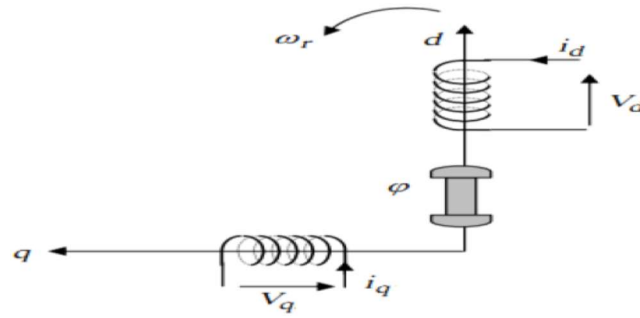


Figure III. 2 : Schéma équivalent d'une MSAP dans le repère (d-q)

III.2.3. Modèle de la machine synchrone dans le repère de Park (d-q)

III.2.3.1. Equations électriques

En faisant l'hypothèse que toutes les grandeurs homopolaires sont nulles, en appliquant la transformation de Park sur le système d'équations (III.1), on aura [23]-[24] :

$$\begin{cases} V_d = R_s i_d + \frac{d\varphi_d}{dt} - \omega_r \varphi_q \\ V_q = R_s i_q + \frac{d\varphi_q}{dt} + \omega_r \varphi_d \end{cases} \quad (III. 9)$$

III.2.3.2. Equations des flux

Les équations des flux statorique s'écrivent dans le repère de Park comme suit :

$$\begin{cases} \varphi_d = L_d i_d + \varphi_f \\ \varphi_q = L_q i_q \end{cases} \quad (III. 10)$$

En remplaçant les expressions des flux φ et φ_q dans le système (III.9) nous obtenons :

$$\begin{cases} V_d = R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega_r L_q i_q \\ V_q = R_s i_q + L_d \frac{di_q}{dt} + \omega_r (L_d i_d + \varphi_f) \end{cases} \quad (III. 11)$$

Avec :

$V_d V_q$: Les tensions statoriques dans le repère (d, q),

$i_d i_q$: Les courants statoriques dans le repère (d, q),

$\varphi_d \varphi_q$: Les flux statoriques dans le repère (d, q),

φ_f : Flux induit par les aimants permanents,

$L_d L_q$: Inductance cyclique statorique d'axe direct 'd' et d'axe quadratique 'q'.

III.2.3.3. Expression de la puissance et du couple électromagnétique

L'expression du couple est obtenue à partir de celle de la puissance instantanée absorbée par la machine :

$$P_a = V_a i_a + V_b i_b + V_c i_c \quad (III. 12)$$

Dans le référentiel de PARK, cette puissance s'écrit:

$$P_a = \frac{3}{2}(V_d i_d + V_q i_q) \quad (III. 13)$$

En remplaçant, par leurs expressions on aura [25] [26]:

$$P_a(t) = \frac{3}{2}[P\Omega(L_d - L_q)i_d \cdot i_q + \varphi_f i_q + R_s(i_d^2 + i_q^2) + (i_d L_d \frac{di_d}{dt} + i_q L_q \frac{di_q}{dt})] \quad (III. 14)$$

Cette puissance est composée de :

- Puissance perdue par effet joule,
- Puissance électromagnétique,
- La variation d'énergie magnétique emmagasinée.

Le couple générée par la machine est donnée par :

$$C_{em} = \frac{P_{em}}{\Omega} \quad (III. 15)$$

$$C_{em} = \frac{3}{2}p[(L_d - L_q)i_d \cdot i_q + \varphi_f i_q] \quad (III. 16)$$

III.2.3.4. Equations mécaniques

La conversion de l'énergie électrique en énergie mécanique dans les machines synchrones est donnée par la relation suivante :

$$\frac{d\Omega}{dt} = J[\frac{3}{2}P((L_d - L_q)i_d \cdot i_q + \varphi_f i_q - C_r - f_e \Omega)] \quad (III. 17)$$

La forme finale des équations du MSAP dans le référentiel (d-q) est :

$$\left\{ \begin{array}{l} J \frac{d\Omega}{dt} dt = C_{em} - C_r - f_e \Omega \\ \frac{di_d}{dt} = \frac{v_d}{V_q} - R_s \frac{i_d}{L_d} + \omega_r L_q \frac{i_q}{L_d} \\ \frac{di_q}{dt} = \frac{v_q}{L_q} - R_s \frac{i_q}{L_q} - \omega_r L_d \frac{i_d}{L_q} - \frac{\omega_r}{L_d} \varphi_f \\ C_{em} = \frac{3}{2}p[(L_d - L_q)i_d \cdot i_q + \varphi_f i_q] \end{array} \right. \quad (III. 18)$$

Ce système d'équations est maintenant plus simple qu'il est toujours non linéaire. A partir du système d'équation (III.18), nous pouvons représenter le moteur synchrone à aimants permanents par un bloc diagramme illustré par la Figure III.3.

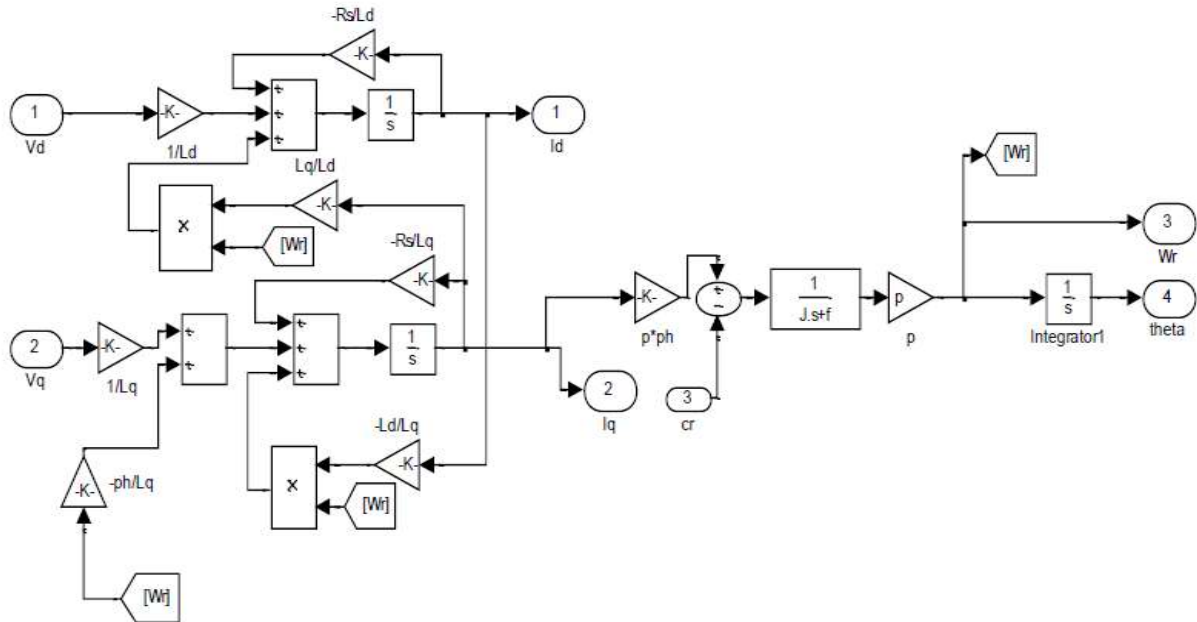


Figure III. 3 : Schéma bloc de la machine synchrone à aimants permanents

L'inertie totale est donnée par l'association machine compresseur soit :

$$J = J_{\text{machine}} + J_{\text{compresseur}}$$

Le frottement visqueux total est donné par l'association machine compresseur :

$$f = f_{\text{machine}} + f_{\text{compresseur}}$$

III.2.4. Commande vectorielle de la MSAP alimenté en tension

Une fois le modèle de la machine établie, il faut mettre en place une structure de commande pour contrôler la vitesse de rotation du compresseur d'air. On commande dans un seul quadrant ($C > 0, \omega > 0$) [27].

Comme le modèle de la machine synchrone à aimants permanents que nous avons présenté ci-dessus est un système multi variable, non linéaire et en plus il est fortement couplé entre les variables d'entrées (tension, fréquence), les variables de sorties (couple, vitesse) et les variables internes de la machine comme le flux.

III.2.4.1. Principe de la commande vectorielle

La commande vectorielle, consiste à régler le flux par une composante du courant et le couple par l'autre composante du courant. Il faut donc, choisir un système d'axe d, q et une loi de commande qui assure le découplage du flux et du couple.

Chapitre III : Modélisation des différents organes d'un véhicule hybride

La stratégie de commande la plus souvent utilisée est celle qui consiste à maintenir le courant I_d à une valeur nulle. Cette stratégie permet de simplifier la commande du couple par la linéarisation de la relation entre le couple et le courant [28] [29].

Si le courant est I_d maintenu nul, physiquement le flux de réaction d'induit est en quadrature avec le flux rotorique produit par les aimants permanents [30], [31] et $\varphi_d = \varphi_f$, l'expression du couple donnée par l'équation (III.16) devient :

$$C_{em} = \frac{3}{2} p * \varphi_f * i_q \quad (III. 19)$$

Comme le flux φ_f est constant, le couple électromagnétique est directement proportionnel à I_q
Donc :

$$C_{em} = K i_q ; K = \frac{3}{2} p * \varphi_f \quad (III. 20)$$

Les équations de tension de la machine, dans ce cas est :

$$\begin{cases} V_d = -L_q \dot{i}_q \\ V_q = R_s \dot{i}_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega_r \varphi_f \end{cases} \quad (III. 21)$$

Nous pouvons remarquer, que le couple est proportionnel au courant i_q donc le modèle de la machine se réduit à celui d'une machine à courant continu à excitation indépendante **Figure III.4** [32].

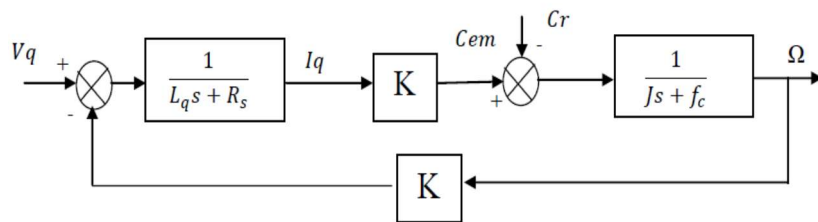


Figure III. 4 : Représentation du modèle découplé de la MSAP

Donc, L'avantage de cette commande lorsque nous imposant I_d nul est que le modèle de la machine synchrone à aimants permanents est devenu linéaire et monovariante et ceci rend cette stratégie de commande très attrayante [33].

III.2.4.2. Description du système global

Le contrôle de la vitesse de la machine, demande une commande simultanée de deux Variables I_d et I_q [34]. Représente le schéma bloc d'une régulation de vitesse de la MSAP alimentée en tension et commandée par orientation du flux dans le repère (d, q).

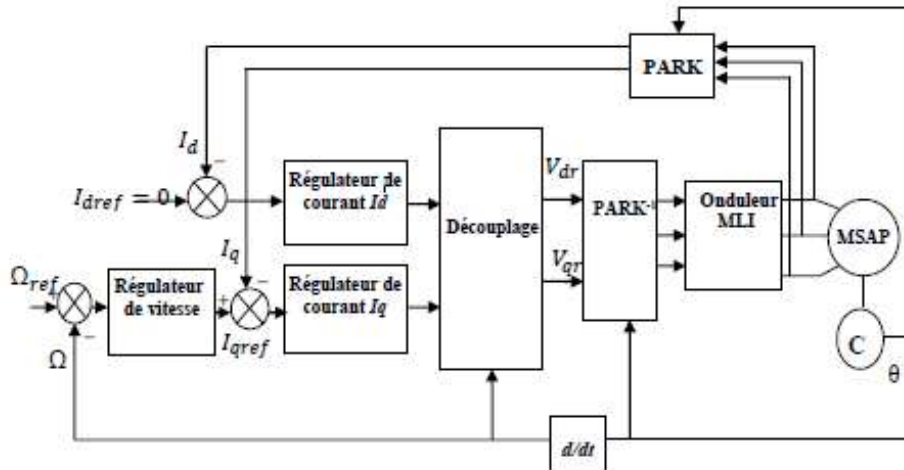


Figure III. 5 : Schéma bloc d'une régulation de vitesse de la MSAP alimentée en tension et commandée par 'orientation du flux

La commande vectorielle est constituée de deux principales boucles à savoir la boucle de vitesse, les boucles internes des courants I_d et I_q et la transformation directe et inverse de Park.

La vitesse est régulée à travers la boucle externe du bloc, la sortie de son régulateur est permet de générer le courant de référence I_{qref} qui est comparé à la valeur du courant I_q issue de la mesure des courants réels et leur erreur appliqué à l'entrée du régulateur du courant I_q . En parallèle avec cette boucle, on trouve une boucle de régulation du courant I_d qui est maintenu à zéro.

Les sorties des régulateurs de courant I_d et I_q sont appliquées à un bloc de découplage qui permet de générer les tensions de référence V_{dr} et V_{qr} et par transformation de Park inverse, on obtient les références de tensions V_{as} , V_{bs} et V_{cs} qui sont les tensions de la commande de l'onduleur à commande MLI.

III.2.4.3. Découplage

Le modèle de la machine synchrone dans le référentiel de Park conduit à un système d'équations différentielles où les courants ne sont pas indépendants l'un de l'autre, ils sont reliés par des termes ou des coefficients non linéaires $W_r I_q$, $W_r I_d$ et $I_d I_q$.

$$\begin{cases} V_d = (L_d \frac{di_d}{dt} + R_s i_d) - \omega_r L_q i_q \\ V_q = (L_q \frac{di_q}{dt} + R_s i_q) + \omega_r (L_d i_d + \varphi_f) \end{cases} \quad (III. 22)$$

Ce couplage est éliminé par une méthode de compensation [35], cette dernière méthode consiste à faire ajouter des termes afin de rendre les axes d et q complètement indépendants.

III.2.4.4. 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 aisément les coefficients des régulateurs.

Le principe de ce découplage revient à définir deux nouvelles variables de commande F_{emd} , F_{emq} telle que [35] [36] :

$$\begin{cases} V_d = V_{d1} - F_{emd} \\ V_q = V_{q1} + F_{emq} \end{cases} \quad (III. 23)$$

$$\begin{cases} V_{d1} = L_d \frac{di_d}{dt} + R_s i_d \\ V_{q1} = L_q \frac{di_q}{dt} + R_s i_q \end{cases} \quad (III. 24)$$

$$\begin{cases} F_{emd} = \omega_r L_q i_q \\ F_{emq} = \omega_r (L_d i_d + \varphi_f) \end{cases} \quad (III. 25)$$

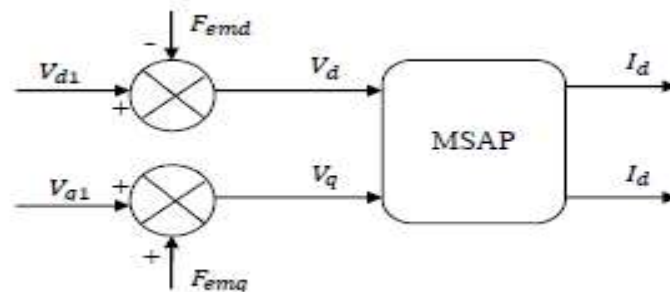


Figure III. 6 : Schéma bloc de compensation

Les courants I_d et I_q sont découplés. Le courant I_d ne dépend que de V_d et le I_q courant ne dépend que de V_q , leurs expressions s'écrivent comme suit :

$$i_d = \frac{V_{d1}}{SL_d + R_s}; \quad i_q = \frac{V_{q1}}{SL_q + R_s} \quad (III. 26)$$

Le principe de correction (régulation) consiste à réguler les courants statoriques à partir des grandeurs de référence (désirées) par les régulateurs classiques PI. Le schéma de principe de régulation des courants statoriques est représenté par la **Figure III.7** [37].

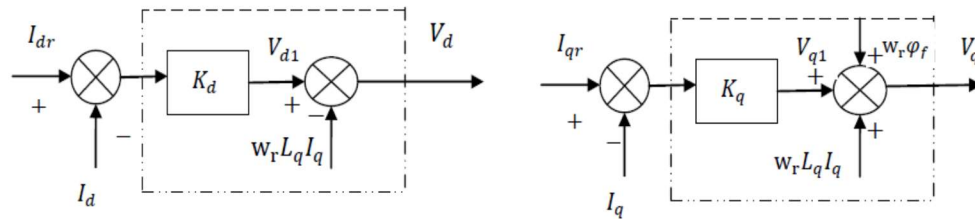


Figure III. 7 : Principe de découplage par compensation

III.3. Modélisation des convertisseurs

Les convertisseurs de puissances permettent d'adapter les courants et tensions entre 2 organes électriques. De plus, selon le sens des courants et des tensions, les convertisseurs peuvent comporter un ou plusieurs quadrants de fonctionnement selon les réversibilités en courant et en tension requises.

III.3.1. L'onduleur triphasé

Dans les véhicules électriques équipés d'un moteur à courant alternatif, il est nécessaire d'interposer entre la source d'énergie et le moteur de traction un dispositif de conversion appelé onduleur, qui transforme l'énergie électrique à courant continu en énergie électrique à courant alternatif et qui permet de réaliser la commande du couple des moteurs et le réglage de la vitesse du véhicule tant en mode traction qu'en mode freinage.

Un onduleur dépend essentiellement de la nature du générateur et du récepteur entre lesquels il est monté. Cela conduit à distinguer en respectant la règle de connexion des sources:

- Les onduleurs de courant alimentés par une source de courant continu
- Les onduleurs de tension alimentés par une source de tension continue et alimentant un récepteur de courant alternatif (exemple machine asynchrone), cas de notre étude. La technologie des onduleurs de tension est la plus maîtrisée et présente dans la plupart des systèmes industriels, dans toutes les gammes de puissance (quelques Watts à plusieurs MW).

III.3.1.1. Modélisation de l'onduleur de tension

L'onduleur de tension assure la conversion de l'énergie continue vers l'alternatif (DC/AC). Cette application est très répandue dans le monde de la conversion d'énergie électrique d'aujourd'hui. L'onduleur peut être utilisé à fréquence fixe, par exemple alimenter

un système alternatif à partir d'une batterie, ou à fréquence (MLI) variable pour la variation de vitesse des machines électriques.

L'onduleur de tension à MLI permet d'imposer à la machine des ondes de tension d'amplitudes et de fréquences variables.

Pour simplifier l'étude, nous supposons que :

- La commutation des interrupteurs est instantanée ;
- La chute de tension aux bornes des interrupteurs est négligeable ;
- la charge est triphasée, équilibrée et couplée en étoile avec un neutre isolé.

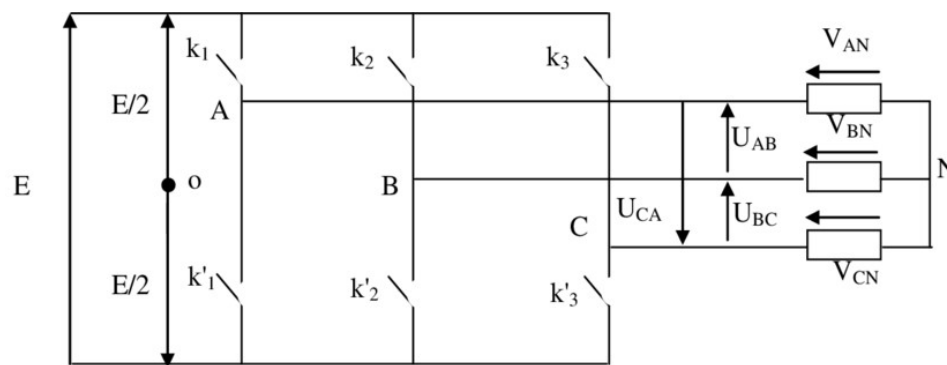


Figure III. 8 : Représentation de l'onduleur de tension triphasé

Les interrupteurs K1, et K'1, K2; et K'2, K3 et K'3 doivent être complémentaires deux à deux, quel que soit la loi de commande à adopter, il est possible d'établir des relations générales que nous utiliserons pour la commande MLI ;quels que soient les courants, les interrupteurs imposent les tensions entre les bornes de A, B, C et le point milieu (fictif) 'O' de la source de tension.

Nous avons :

$$V_{AO} = V_A - V_O = \begin{cases} \frac{E}{2} & \text{si } k1 \text{ est fermé} \\ -\frac{E}{2} & \text{si } k1 \text{ est ouvert} \end{cases} \quad (III. 27)$$

$$V_{BO} = V_B - V_O = \begin{cases} \frac{E}{2} & \text{si } k2 \text{ est fermé} \\ -\frac{E}{2} & \text{si } k2 \text{ est ouvert} \end{cases} \quad (III. 28)$$

$$V_{CO} = V_C - V_O = \begin{cases} \frac{E}{2} & \text{si } k3 \text{ est fermé} \\ -\frac{E}{2} & \text{si } k3 \text{ est ouvert} \end{cases} \quad (III. 29)$$

Chapitre III : Modélisation des différents organes d'un véhicule hybride

Nous pouvons modéliser l'onduleur par une matrice qui nous permet de passer aux grandeurs alternatives (AC), à partir des grandeurs continues (DC) comme suit:

$$[V_{AC}] = [T]. [V_{DC}] \quad (III. 30)$$

Avec :

$$\begin{cases} [V_{AC}] = [V_A \ V_B \ V_C]^T \\ [V_{DC}] = [V_{AO} \ V_{BO} \ V_{CO}]^T \end{cases} \quad (III. 31)$$

Et la matrice de passage de l'onduleur est la suivante :

$$[T] = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \quad (III. 32)$$

III.3.2. Les convertisseurs DC-DC (hacheurs)

Les hacheurs sont des convertisseurs statiques qui permettent le transfert de l'énergie électrique d'une source continue vers une autre source continue. La grande variété de topologie des circuits de convertisseurs varie entre une configuration simple à base d'un transistor unique des configurations complexes comportant plusieurs interrupteurs, Selon la position du commutateur d'hacheur ; différents types de convertisseurs de tension peuvent être réalisés à savoir :

- Hacheur élévateur de tension « Boost »
- Hacheur abaisseur -élévateur de tension « Buck-Boost »

a. Convertisseur Boost (élévateur de tension)

Un convertisseur Boost, ou hacheur parallèle, est une alimentation à découpage représenté sur la **Figure III.9** qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus forte valeur [38].

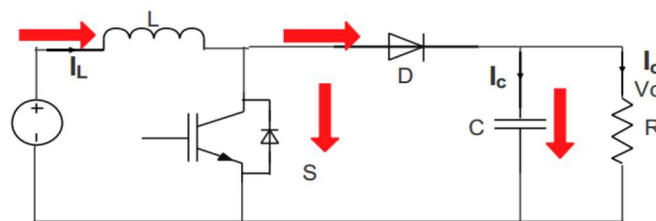


Figure III. 9 : Schéma de principe d'un convertisseur Boost

On suppose les hypothèses suivantes : Les composants sont idéals et sans perte, grâce à l'hypothèse idéale, $V_C = V_O$, donc On écrit les équations d'état en CCM pour chaque intervalle de fonctionnement comme suite :

Interrupteur S fermé :

La tension de la charge chute immédiatement à zéro si le condensateur C est omis. Le courant du circuit I_L circule à travers l'inductance L et augmente, les équations d'état sont :

$$\begin{cases} L \frac{dI_L}{dt} = V_{in} \\ C \frac{dV_O}{dt} = - \frac{V_O}{R} \end{cases} \quad (III. 33)$$

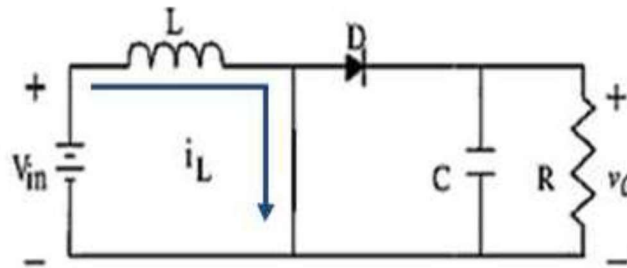


Figure III. 10 : convertisseur Boost S bloqué

Interrupteur S ouvert :

Le courant I_L traversant l'inductance et traverse ensuite la diode D, le condensateur C et la charge. Il en résulte un transfert de l'énergie accumulée dans l'inductance vers le condensateur. Le courant décroît ensuite progressivement, car $V_0 > V_{in}$:

Les équations d'état en CCM sont :

$$\begin{cases} L \frac{dI_L}{dt} = V_{in} - V_O \\ C \frac{dV_O}{dt} = I_L - \frac{V_O}{R} \end{cases} \quad (III. 34)$$

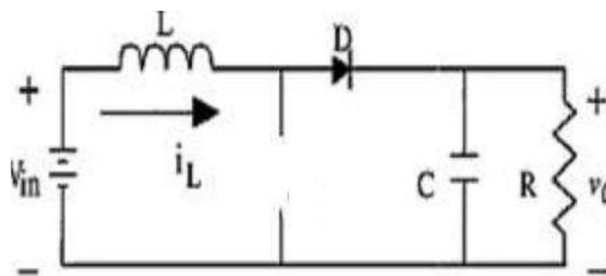


Figure III. 11 : convertisseur Boost S ouvert

Les équations d'état pour le cycle de commutation :

$$\begin{cases} L \frac{dI_L}{dt} = V_{in} - (1 - d)V_O \\ C \frac{dV_O}{dt} = (1 - d) I_L - \frac{V_O}{R} \end{cases} \quad (III. 35)$$

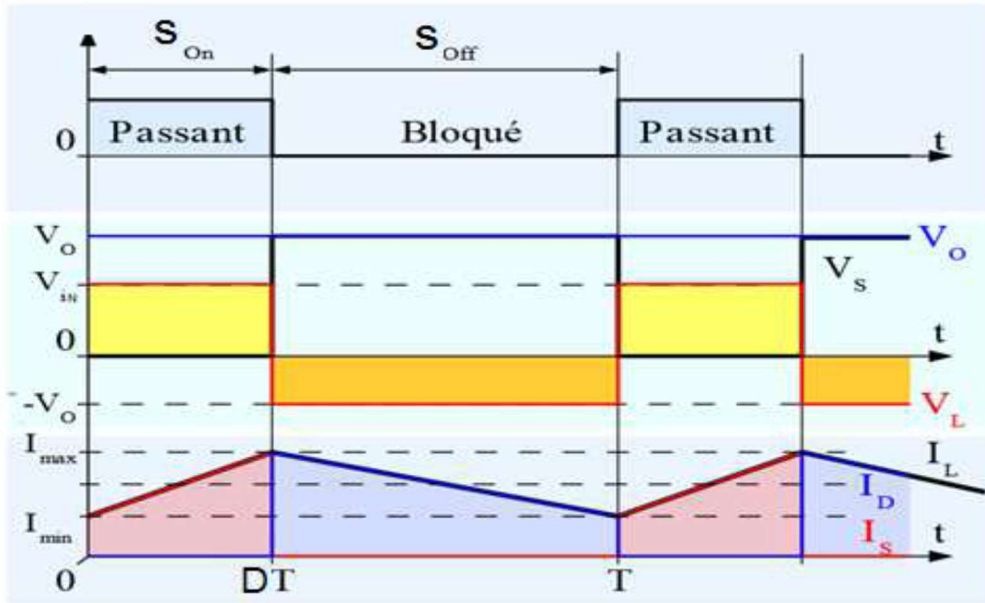


Figure III. 12 : Formes d'ondes courant/tension dans un Convertisseur Boost

b. Convertisseur buck-Boost

Le hacheur série parallèle est un convertisseur indirect DC-DC. Son rôle principal est de convertir la tension constante d'entrée à une tension supérieure ou inférieure mais de polarité inverse. La source d'entrée est de type tension continue montée en parallèle avec un condensateur et une charge résistive **Figure III.13**.

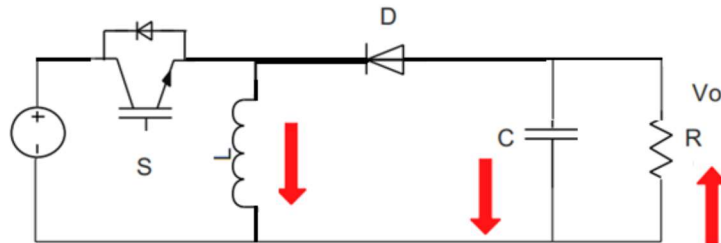


Figure III. 13 : Architecture d'un convertisseur Buck-boost idéal

Interrupteur S ouvert:

Dans l'état passant, l'interrupteur S **Figure III.14** est fermé, conduisant ainsi à une augmentation de l'énergie stockée dans l'inductance L

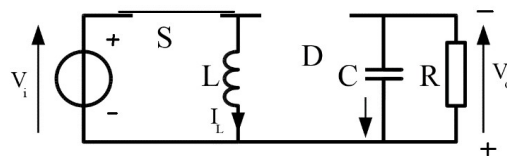


Figure III.14: convertisseur buck-boost S Ouverte

Chapitre III : Modélisation des différents organes d'un véhicule hybride

$$\begin{cases} L \frac{dI_L}{dt} = V_{in} \\ C \frac{dV_O}{dt} = I_L - \frac{V_O}{R} \end{cases} \quad (III. 36)$$

Interrupteur S fermé :

Dans l'état bloqué, l'interrupteur S est ouvert. L'inductance est reliée à la charge et à la capacité. Il en résulte un transfert de l'énergie accumulée dans l'inductance vers la capacité et la charge. Les équations d'état en CCM sont :

$$\begin{cases} L \frac{dI_L}{dt} = V_O \\ C \frac{dV_O}{dt} = I_L - \frac{V_O}{R} \end{cases} \quad (III. 37)$$

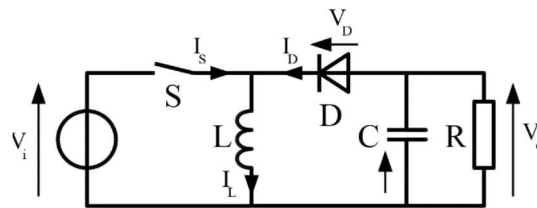


Figure III. 15 : convertisseurs buck-boost S fermé

Les équations d'état pour le cycle de commutation :

$$\begin{cases} L \frac{dI_L}{dt} = V_{in} + (1 - d)V_O \\ C \frac{dV_O}{dt} = (1 - d) I_L - \frac{V_O}{R} \end{cases} \quad (III. 38)$$

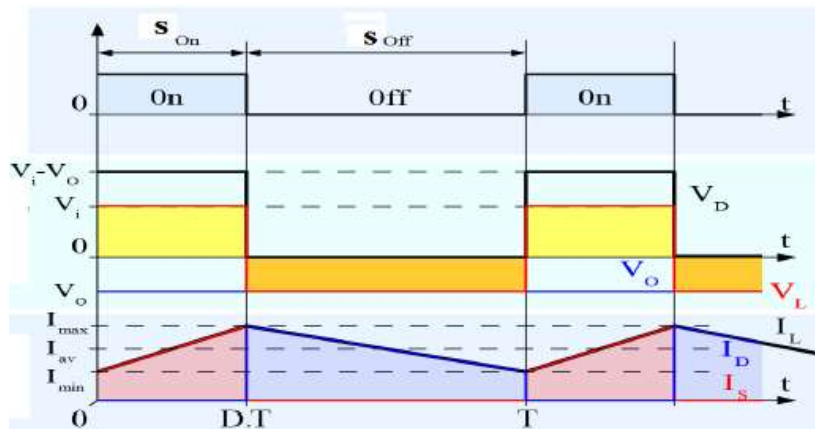


Figure III. 16 : Formes d'ondes courant/tension dans un convertisseur Buck-Boost

III.4. Modélisation de la batterie

Il existe plusieurs modèles de batterie au plomb et leur mise en œuvre n'est pas aisée du fait de la prise en compte de plusieurs paramètres. Suivant les applications et les contraintes auxquelles elles sont soumises, les batteries réagissent différemment, et donc on ne trouve pas de modèle unique qui soit exact dans toutes les circonstances. Notre choix s'est porté sur le modèle dit «CIEMAT» relativement complet, malgré quelques imperfections comme le saut de tension lorsqu'on passe d'un cycle de charge à un cycle de décharge, ce modèle est basé sur le schéma suivant **Figure III.17** où la batterie est décrite par seulement deux éléments, une source de tension et une résistance interne, dont les valeurs dépendent d'un certain nombre de paramètres.

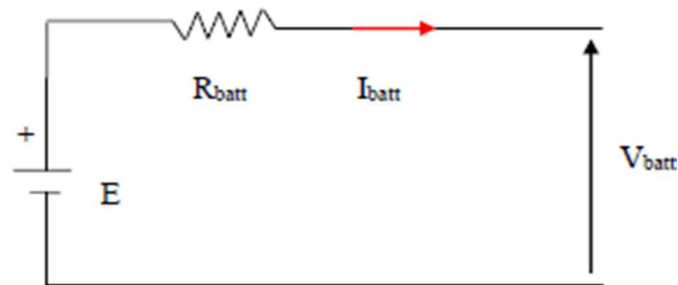


Figure III. 17 : schéma électrique équivalent de la batterie

Dans ce modèle, pour $n_{bcellules}$ en série, la tension aux bornes de la batterie est donnée ci-dessous :

$$V_{batt} = n_b E_b \pm R_{batt} I_{batt} \quad (III. 39)$$

V_{batt} et I_{batt} sont la tension et le courant de la batterie, E_b est la f.e.m. (force Électromotrice) d'une cellule de la batterie et R_{batt} sa résistance interne c.

III.4.1. Modélisation de Capacité C_{bat}

Le modèle de la capacité C_{bat} donne la quantité d'énergie que peut restituer la batterie en fonction du courant moyen de décharge $I_{batt.moy}$. Cette capacité est donnée par l'équation.

$$C_{bat} = \frac{1.67C10}{1+0.67*\left(\frac{I_{batt.moy}}{I_{10}}\right)^{0.9}} (1 + 0.005\Delta T) \quad (III. 40)$$

Chapitre III : Modélisation des différents organes d'un véhicule hybride

Avec :

I_{10} : Courant nominal de la batterie (en A) donne par le constructeur ;

C_{10} : Capacité nominale de la batterie (en Ah) en régime de décharge a courant constant durant 10 heures. Elle est donnée par le constructeur et elle est telle que :

$$C_{10} = 10 \times I_{10} \quad (III. 41)$$

ΔT : L'échauffement de la batterie par rapport à la température ambiante de 25°C. Il est supposé identique pour tous les éléments de la batterie.

L'état de charge de la batterie EDC est fonction de la capacité C_{bat} et de la quantité de charge manquante à la batterie Q_m . L'évolution temporelle de cette dernière, dépend du mode de fonctionnement de la batterie, elle est définie par (Q_m):

$$Q_m = C_{bat} \times 10 \quad (III. 42)$$

Ou test la durée de fonctionnement de la batterie avec un courant I_{bat} . L'expression de l'état de charge de la batterie EDC est donnée par (III.43):

$$EDC = 1 - \frac{Q_m}{C_{batt}} \quad (III. 43)$$

III.4.1.1. Equations de la tension de décharge

En régime de décharge, la f.e.m. et la résistance interne sont déterminées par (III.44) et (III.45).

$$E_{b_déch} = 1.965 + 0.12 EDC \quad (III. 44)$$

$$R_{b_déch} = R_{batt} = \frac{1}{c_{10}} \left(\frac{4}{1+|I_{batt}|^{0.3}} + \frac{0.27}{EDC^{1.5}} \right) \quad (III. 45)$$

D'où l'expression de la tension de batterie, pour ce régime de décharge :

$$V_{b_déch} = n_b E_{b_déch} - \frac{n_b E_{b_déch}}{I_{batt}} \quad (III. 46)$$

$$V_{b_déch} = n[1.965 + 0.12EDC] - n \frac{|I_{batt}|}{c_{10}} \left(\frac{4}{1+|I_{batt}|^{0.3}} + \frac{0.27}{EDC^{1.5}} + 0.02 \right) (1 - 0.007\Delta T) \quad (III. 47)$$

III.4.1.2. Equations de la tension de charge

En régime de charge et avant l'apparition du phénomène de "Gassing" (dégagement gazeux d'hydrogène et d'oxygène), la f.e.m. et la résistance interne sont déterminées par (III.48) et (III.49)

Chapitre III : Modélisation des différents organes d'un véhicule hybride

$$E_{b_char} = 2 + 0.16 EDC \quad (III. 48)$$

$$R_{b_ch} = R_b = \frac{1}{c_1} \left(\frac{6}{1+|I_{batt}|^{0.86}} + \frac{0.48}{(1-EDC)^{1.2}} + 0.036 \right) (1 - 0.025\Delta T) \quad (III. 49)$$

D'où l'expression de la tension de la batterie avant la surcharge

$$V_{bat_char} = n b E_{b_char} + n b R_{b_char} I_{batt} \quad (III. 50)$$

$$V_{bat_char} = n[2 + 0.16EDC] - n \frac{|I_{batt}|}{c_{10}} \left(\frac{6}{1+|I_{batt}|^{0.86}} + \frac{0.48}{EDC^{1.2}} + 0.036 \right) (1 - 0.025\Delta T) \quad (III. 51)$$

III.5. Modélisation de la pile à combustible PEMFC

La modélisation statique d'une pile à combustible PEMFC est basée sur l'expression de la tension en fonction du courant débité. La tension en charge de la pile résulte des différentes chutes de tension dues à : la surtension d'activation (chute d'activation de la région 1), la surtension ohmique (chute ohmique de la région 2) et à la surtension de concentration (chute de concentration de la région 3)

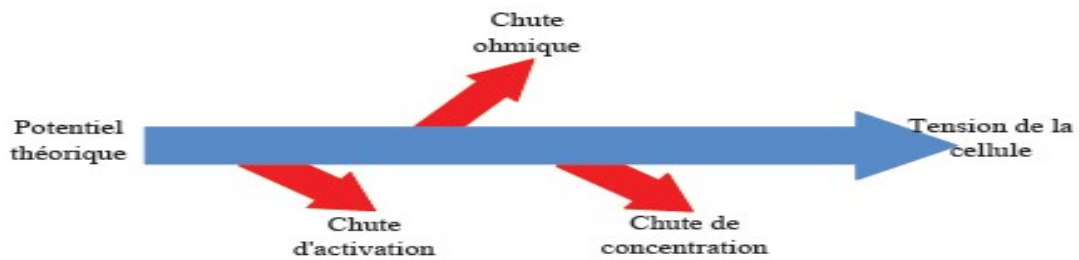


Figure III. 18 : Bilan de tension de sortie de la pile à combustible

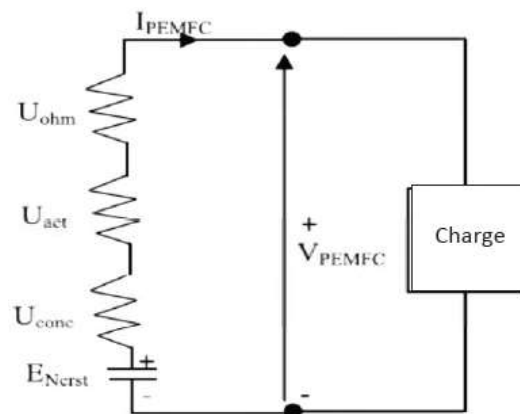


Figure III. 19 : Représentation électrique de la PEMFC

L'équation suivante représente la tension à la sortie du PAC

$$V_{PEMFC} = E_{Nerst} - U_{act} - U_{ohm} - U_{con} \quad (III. 52)$$

V_{PEMFC} : La tension réelle d'une pile unitaire (volt);

E_{Nerst} : Potentiel thermodynamique (idéal) de chaque pile et représente la tension réversible (volt);

U_{act} : Pertes d'activation (volt);

U_{ohm} : Pertes ohmique (volt);

U_{con} : Pertes de concentration (volt);

L'équation du potentiel thermodynamique (idéal) est donnée par l'équation suivante

$$E_{Nerst} = \alpha_1 + \alpha_2(T_{PEMFC} - 298.15) + \alpha_3 * T_{PEMFC} (0.5 \ln (P_{O_2} *) + \ln(P_{H_2} *)) \quad (III. 53)$$

III.5.1. Pertes d'activation

Les pertes d'activation sont dues au démarrage des réactions chimiques à l'anode et à la cathode. Elles surgissent des mouvements de transfert des charges dans l'interface (électrode-électrolyte). Une partie de l'énergie disponible est utilisée pour briser et reformer les liaisons chimiques aux électrodes. Si ces pertes interviennent aux deux électrodes, la réaction d'oxydation de l'hydrogène à l'anode est beaucoup plus rapide que la réduction de l'oxygène à la cathode. Il s'ensuit que les pertes d'activation sont essentiellement dues aux réactions cathodiques.

Les polarisations d'activation de la réaction d'oxygène décroissent parce que le potentiel se déplace dans le sens négatif, ce qui fait que, les polarisations d'activations sont importantes, que pour des densités de courant faible. Les facteurs qui peuvent contribuer aux polarisations d'activation sont la pression ainsi que la concentration des gaz réactifs :

$$U_{act} = \beta_1 + \beta_2 T_{PEMFC} + \beta_3 T_{PEMFC} \ln (j. 5.10^{-3}) + \beta_4 T_{PEMFC} \ln C_{O_2} * \quad (III. 54)$$

$$C_{O_2} = \frac{P_{O_2} *}{5.08 * 10^6 * e^{\left(\frac{-498}{T_{PEMFC}}\right)}} \quad (III. 55)$$

$$C_{H_2} * = \frac{P_{H_2} *}{1.08 * 10^6 * e^{\left(\frac{77}{T_{PEMFC}}\right)}} \quad (III. 56)$$

Chapitre III : Modélisation des différents organes d'un véhicule hybride

$$P_{O_2}^* = P_{cath} [1 - X_{H_2O}^{sat}] \quad (III. 57)$$

$$P_{H_2}^* = P_{anod} \left[1 - \frac{1}{2} X_{H_2O}^{sat} \right] \quad (III. 58)$$

Avec :

C_{O_2} : est la concentration de l'oxygène dans l'interface de la surface cathodique (mol/cm^3)

$-C_{H_2}^*$: est la concentration de l'hydrogène dans l'interface de la surface anodique (mol/cm^3)

P_{cath} : Pression de l'oxygène à la cathode

P_{anod} : Pression de l'hydrogène à l'anode

$P_{O_2}^*$: Pression partielle de l'oxygène (atm)

$P_{H_2}^*$: Pression partielle à l'interface de l'hydrogène (atm)

Où T_{PEMFC} : la température opératoire absolue de la pile ($^{\circ}K$).

$-X_{H_2O}^{sat}$: Fraction molaire de saturation d'eau dans le gaz humidifié (=0.5)

III.5.2. Pertes ohmique

Les chutes de tension ohmiques sont dues à la résistance qu'opposent les électrodes et les plaques bipolaires à la circulation des électrons et la membrane au passage des protons :

$$U_{ohm} = \frac{em}{\sigma_{Scell}} j \quad (III. 59)$$

$$U_{ohm} = I_{PEMFC} (R_m + R_c) \quad (III. 60)$$

$$R_M = \frac{rm * l}{\sigma_{Scell}} \quad (III. 61)$$

Avec :

$$rm = \frac{181.6 \left[1 + 0.03 \left(\frac{I_{PEMFC}}{S_{cell}} \right) + 0.062 \left(\frac{T_{PEMFC}}{303} \right)^2 \left(\frac{I_{PEMFC}}{S_{pile}} \right)^{2.5} \right]}{\left[\lambda - 0.634 - 3 \left(\frac{I_{PEMFC}}{S_{PEMFC}} \right) \right] \exp \left[4.18 \left(\frac{T_{PEMFC} - 303}{T_{PEMFC}} \right) \right]} \quad (III. 62)$$

$$U_{ohm} = \frac{I_{PEMFC}}{S_{cell}} \left(\frac{181.6 \left[1 + 0.03 \left(\frac{I_{PEMFC}}{S_{cell}} \right) + 0.062 \left(\frac{T_{PEMFC}}{303} \right)^2 \left(\frac{I_{PEMFC}}{S_{pile}} \right)^{2.5} \right]}{\left[\lambda - 0.634 - 3 \left(\frac{I_{PEMFC}}{S_{PEMFC}} \right) \right] \exp \left[4.18 \left(\frac{T_{PEMFC} - 303}{T_{PEMFC}} \right) \right]} l + S_{cell} \cdot RC \right) \quad (III. 63)$$

Avec :

- j : densité de courant (A/cm²) ;

- S_{cell} : Surface active des cellules (cm²) ;

- l : l'épaisseur de la membrane (μm) ;

- R_c : Résistance équivalente de contacte à la conduction des électrodes (Ω) ;

- R_m : Résistance équivalente de la membrane (Ω) ;

- rm : Résistance spécifique de la membrane (Ω. cm) ;

- σ : Conductivité de la membrane (S.cm-1) ;

- em : Epaisseur de la membrane (μm) ;

- λ : est la teneur en eau dans la membrane, admettant une valeur minimale et maximale respectivement de 0 et de 22.

III.5.3. Pertes de concentration

La consommation des gaz appauvrit les mélanges gazeux et diminue la pression partielle des gaz. Cette réduction de pression dépend du courant délivré et des caractéristiques des circuits de gaz.

La chute de tension s'exprime en fonction d'un courant limite (j_{max}), pour lequel tout le combustible étant utilisé, sa pression tomberait à zéro, et d'une constante B appelée constante de transport ou de transfert de masse ($B= 0.0116v$).

$$U_{conc} = -B \left(1 - \frac{j}{j_{max}} \right) \quad (III. 64)$$

- α_i et β_i : Constantes adimensionnelles présent dans les travaux d'Amphlett.

III.5.4. Caractéristique électrique de la pile à combustible

La modélisation sous Matlab/Simulink d'une cellule d'une pile à combustible, permet d'obtenir les caractéristiques électriques suivantes :

III.5.4.1. Caractéristique tension-densité de courant d'une PEMFC

La **Figure III.20** représente la caractéristique électrique d'une cellule de la PEMFC.

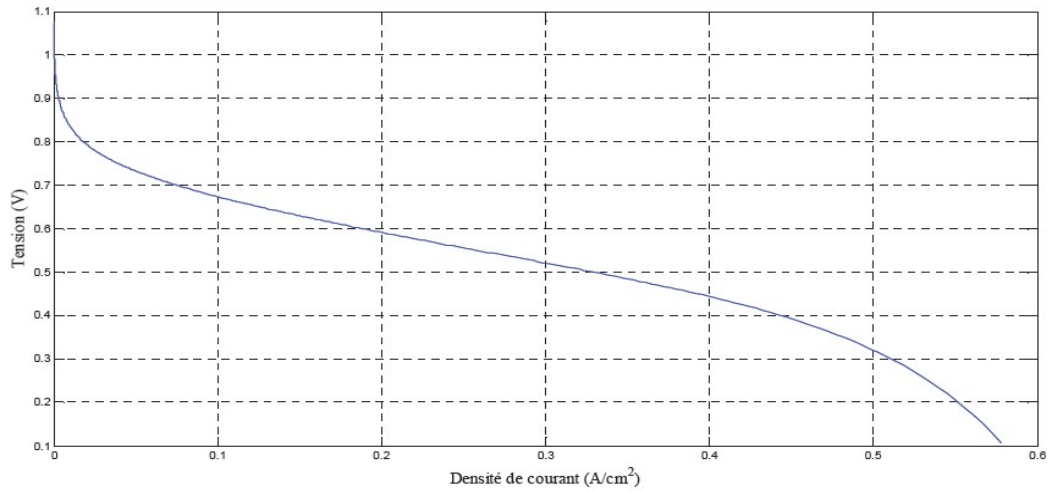


Figure III. 20 : Caractéristique Tension-Densité de courant

III.5.4.2. Caractéristique puissance-densité de courant d'une PEMFC

La caractéristique Puissance-Densité de courant est représentée dans la figure suivante.

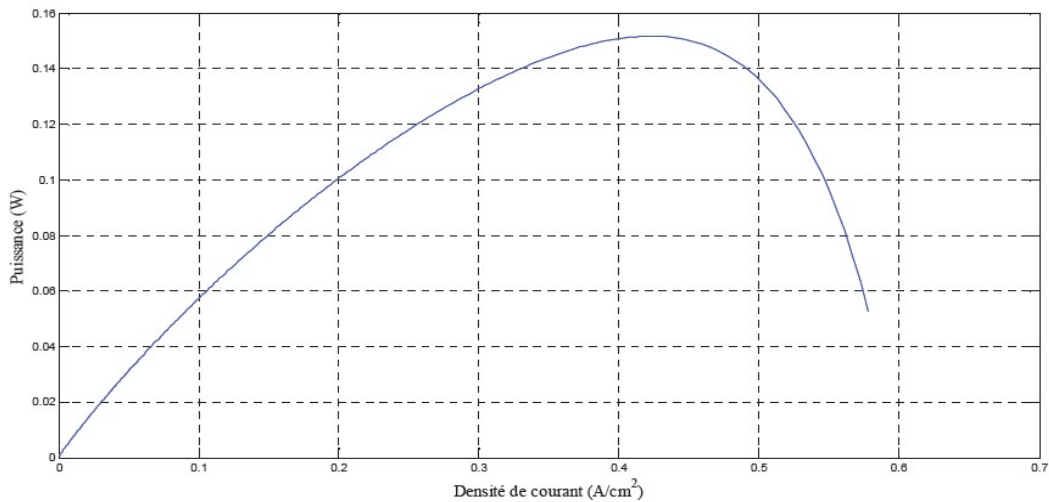


Figure III. 21 : Caractéristique Puissance-Densité de courant

III.6. Modélisation des super-condensateurs

La modélisation consiste à définir tout d'abord le modèle comportemental d'une cellule puis celui du pack des super-condensateurs formé de plusieurs cellules en série. En d'autres termes, plus le modèle de la cellule élémentaire est complexe, plus le modèle du pack des super-condensateurs devient difficile voire impossible à mettre en équation. C'est pour cette raison qu'on ne cherchera pas à établir un modèle sophistiqué qui tient compte de tous les phénomènes physique des super-condensateurs. Notre approche consiste donc à étudier et à

simplifier les modèles comportementaux existants sans que la précision et le comportement électrique du composant soient altérés.

III.6.1. Modèle des supercondensateurs à deux branches RC

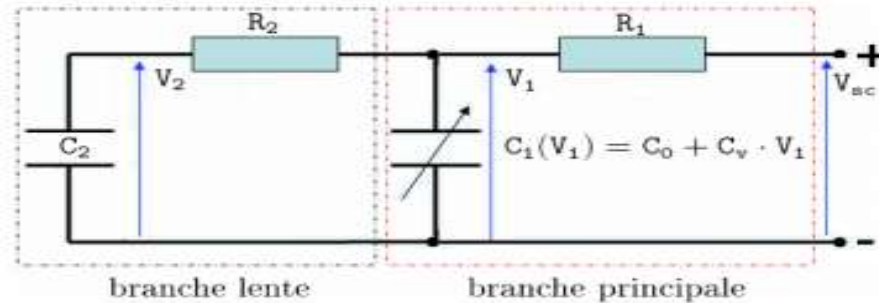


Figure III. 22 : Modèle de R. Bonert et L. Zubieta

Repose sur la partition de l'énergie électrostatique des super-condensateurs en énergie rapidement stockée et en énergie lentement stockée. La première branche, appelée branche principale traduit le comportement énergétique du composant pendant les phases de charge et de décharge. La seconde branche, dite lente décrit les phénomènes de redistribution interne des charges électriques après les phases de charge et de décharge. La capacité de la branche principale varie linéairement en fonction de la tension à ces bornes.

$$C_1(V_1) = C_0 + k_v \cdot V_1 \quad (III. 65)$$

III.6.2 Modèle d'une cellule sans branche lente

En négligeant la branche lente du modèle de R. Bonert et L. Zubieta, **Figure III.22**, le modèle du super-condensateur devient équivalent à la branche principale, **Figure III.23**. Pour une cellule, la résistance R1 correspond à la résistance interne (ESR) du composant et la capacité C1(V1) renferme deux composantes. La première C0, est constante et la seconde $k_v \cdot V_1$, est variable en fonction de la tension aux bornes de la capacité.

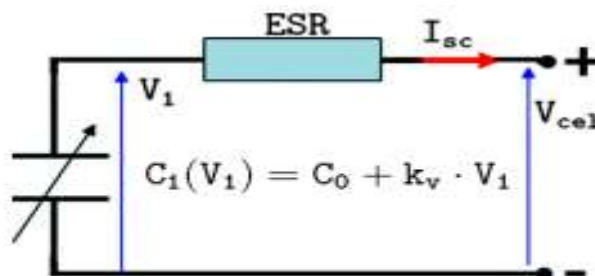


Figure III. 23 : Modèle de la cellule sans branche lente

Chapitre III : Modélisation des différents organes d'un véhicule hybride

Pour analyser le circuit du modèle sans branche lente, on admet que le courant du supercondensateur I_{sc} est positif pendant la phase de décharge (traction) et il est négatif pendant la phase de charge (freinage). Dans le but de simplifier l'écriture des équations, nous omettons volontairement la variable temps (t) dans l'écriture des variables instantanées suivantes : I_{sc} , V_1 , V_{cel} , Q_{cel} , P_{cel} et E_{cel} . D'après la loi de maille, la tension aux bornes de la cellule peut être présentée par (III.66)

$$V_{cel} = V_1 - ESR \cdot I_{sc} \quad (III. 66)$$

La quantité de charge stockée sur l'armature de la cellule s'exprime par (III.67)

$$Q_{cel(t)} = C_1(V_1) \cdot V_1 = \{C_0 + kv \cdot V_1\} \cdot V_1 \quad (III. 67)$$

Et quant aux caractéristiques électriques courant et puissance instantanée de la cellule, elles sont données par (III.68).

$$\begin{cases} I_{sc} = \frac{dV_1}{dt} \frac{d(Q_{cel})}{dV_1} \\ P_{cel} = V_{cel} \cdot I_{sc} \end{cases} \quad (III. 68)$$

L'expression de l'énergie pour une décharge de la cellule à courant constant est donnée par (III.69).

$$\begin{cases} E_{cel} = \int P_{cel} \cdot dt \\ E_{cel} = \frac{1}{2} \cdot C_0 \cdot V_1^2 + \frac{2}{3} \cdot kv \cdot V_1^3 - \{C_0 \cdot V_1 + kv \cdot V_1^2\} \cdot ESR \cdot I_{sc} + c \text{ ste} \end{cases} \quad (III. 69)$$

L'énergie utile fournie par la cellule pendant la phase de décharge à courant constant et pour une profondeur de décharge $\sigma = \frac{V_{1min}}{V_{1max}}$ est donnée par (III.70).

$$\begin{cases} Eu = \int_{V_{1min}}^{V_{1max}} P_{cel} \cdot dt = EC_0 + EC_{VAR} - E_{dis} \\ EC_0 = \frac{1}{2} \cdot c_0 \cdot (1 - \sigma^2) \cdot V1^2 \text{ max} \\ EC_{VAR} = \frac{2}{3} \cdot kv \cdot (1 - \sigma^3) \cdot V1^3 \text{ max} \\ E_{dis} = \{c_0 \cdot (1 - \sigma) \cdot V_{1max} + kv \cdot (1 - \sigma^2) \cdot V1^2 \text{ max}\} \cdot ESR \cdot I_{sc} \end{cases} \quad (III. 70)$$

L'expression (III.70) renferme trois termes, le premier EC_0 est la quantité d'énergie fournie par la capacité constante C_0 , le second EC_{VAR} correspond à la quantité d'énergie fournie par la capacité variable ($kv \cdot V_1$) et le troisième E_{dis} représente la quantité d'énergie dissipée dans la résistance interne de la cellule.

III.7. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons modélisé les différentes parties de notre système étudié, à savoir la source d'énergie électrique ; pile à combustible, batterie et super-condensateur, les différents convertisseurs d'électronique de puissance (hacheur booste /buck-boost) ainsi que le modèle du véhicule électrique avec son moteur (MSAP). Nous avons aussi présenté la commande vectorielle ainsi que l'onduleur utilisé.

A blue scroll graphic with a white border, featuring a vertical strip on the left side and a small circular detail at the top right corner. The text is centered within the scroll.

Chapitre IV
La gestion d'énergie

IV.1. Introduction

Dans un véhicule hybride à pile à combustible, la répartition de puissance entre le système PAC et la source secondaire d'énergie doit satisfaire la demande de puissance de la machine électrique et tient compte des contraintes de fonctionnement (puissances PAC et secondaire limitées, état de charge de la source secondaire etc.).

La contrainte imposée au système concerne la limitation de la puissance de la pile combustible et sa réponse en régime dynamique. Il s'agit de calculer la puissance de référence du super-condensateur qui minimise l'énergie fournie par la pile à combustible à partir de la puissance sollicitée au niveau de la charge à savoir la motorisation et les auxiliaires.

IV.2. Le stockage d'énergie

Les piles à combustible, les batteries et les super-condensateurs ont des propriétés électriques très différentes. Le plan de Ragone **Figure IV.1** montre la différence de puissance spécifique et de capacité de diverses sources puissance. La pile à combustible et l'hydrogène disposent de la capacité spécifique la plus élevée. Suivies des batteries puis des super-condensateurs. A l'inverse, les super-condensateurs disposent de la puissance spécifique la plus importante, suivies des batteries puis de la pile à combustible.

IV.2.1. La source secondaire d'énergie

La principale caractéristique des sources d'énergie secondaires est que leur puissance est réversible. Une source d'énergie secondaire peut soit récupérer de l'énergie cinétique, soit être rechargée par un système de pile à combustible. Les véhicules hybrides à pile à combustible utilisent généralement deux technologies pour former une source d'énergie secondaire : les batteries et les super-condensateurs.

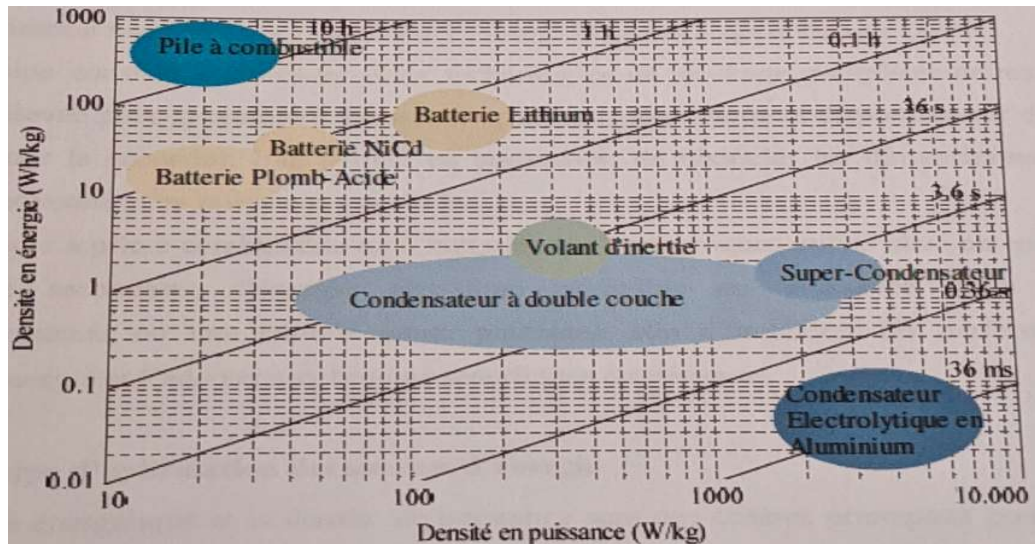


Figure IV. 1 : plan de ragone

IV.2.2. Source d'énergie irréversible

L'hydrogène utilisé dans un moteur à combustion ou dans une pile à combustible, les biocarburants (éthanol, méthanol, butanol, huiles végétales, etc.). Les véhicules hybrides vendus à ce jour utilisent des moteurs à essence pour les marchés américain et japonais. Des véhicules hybrides à moteur diesel sont en cours de développement pour le marché européen.

IV.2.3. Source d'énergie réversible

La réversibilité des sources d'énergie secondaires est un facteur important dans l'efficacité énergétique des véhicules hybrides. Cela permet de récupérer l'énergie cinétique du véhicule, notamment lors du freinage (alors qu'elle est généralement dissipée sous forme de chaleur dans un véhicule conventionnel). Plusieurs technologies sont envisageables.

IV.3. Hybridation des sources d'énergie

Comme pour les véhicules thermiques hybrides, l'hybridation se fait au niveau du stockage d'énergie en amont plutôt qu'au niveau de la motorisation.

Le principe consiste à combiner deux techniques de stockage complémentaires : la première à forte énergie spécifique, la seconde à forte puissance spécifique disponible sur une durée adaptée. En particulier, les dimensions peuvent être divisées en puissance moyenne et en puissance transitoire.

Les véhicules alimentés par des piles à combustible ou des batteries électrochimiques peuvent donc utiliser des sources d'énergie électrique secondaires à puissance réversible, telle

que des super-condensateurs ou une batterie haute puissance afin d'améliorer les performances du stockeur d'énergie et l'adapter aux besoins spécifiques du transport.

IV.3.1. Principe d'hybridation des sources d'énergie

La densité d'énergie et la densité de puissance sont les principaux critères de choix d'un système de stockage pour véhicule électrique.

Pour des applications telles que les véhicules électriques avec une seule source d'énergie (solutions mono-sources), 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 >>.

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.

On peut ainsi avoir pour objectif de maîtriser différents critères comme le volume, la masse, le coût d'investissement ou d'utilisation, du encore sa durée de vie. Le principe d'hybridation des sources de stockage est illustré en **Figure.IV.2**. 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.

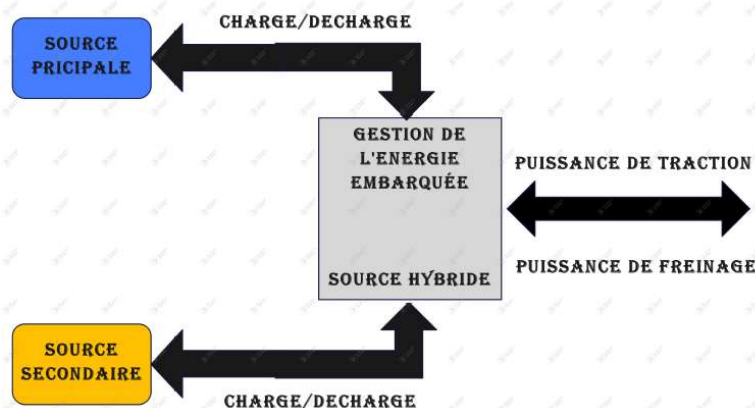


Figure IV. 2 : Principe d'hybridation des sources de stockage hybrides

IV.3.2. Solutions d'hybridation des sources d'énergie

Le comportement global du système dépend à la fois du placement et de la sélection des périphériques de stockage au sein de la source hybride. Solutions d'hybridation des sources d'énergie couramment rencontrées en traction, telles que les piles à combustible et les batteries électrochimiques.

IV.3.2.1. Hybridation des Piles à Combustible (PAC)

Cette hybridation offre de bonnes performances en termes d'autonomie, de puissance disponible et de continuité de service. Il existe une multitude de possibilités de couplage entre les piles à combustible et les sources de stockage de puissance.

Le principe de couplage « PAC/source de puissance » est illustré sur la **Figure IV.3**.

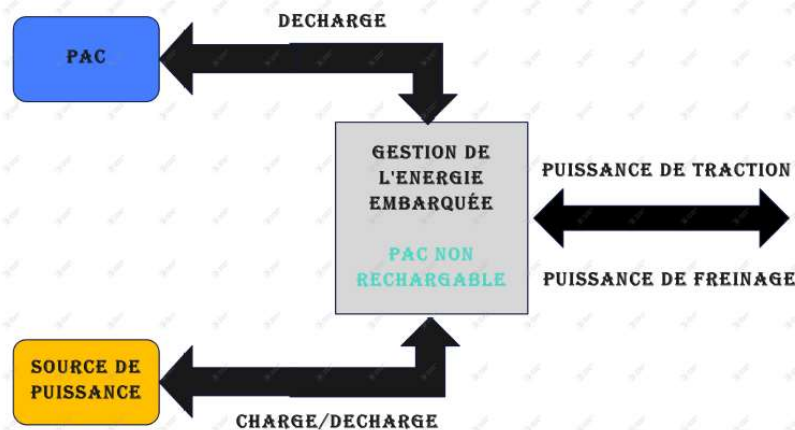


Figure IV. 3 : Principe d'hybridation PAC/Source de puissance

Dans les véhicules hybrides, un super-condensateur ou un système de stockage d'énergie sur batterie associées aux PAC est essentiellement destiné à fournir le complément de puissance pendant les fortes accélérations, lorsque la pile atteint sa puissance maximale, et récupérer l'énergie de freinage.

IV.4. La gestion d'énergie à bord du véhicule

La gestion des échanges de puissance dans la chaîne de traction d'un véhicule hybride à pile à combustible est un élément clef dans l'optimisation de la consommation en hydrogène du véhicule. La distribution de puissance entre l'élément de stockage (SSE) et la pile à combustible assure la demande en puissance électrique du groupe motopropulseur en minimisant autant que possible la consommation d'hydrogène sur un parcours.

La consommation d'hydrogène est quantifiée sous forme de fonction de cout à minimiser.

Cette fonction est évaluée sur un horizon défini de temps afin de pouvoir quantifier les énergies électriques mises en œuvre qui peuvent être temporairement stockées pour être utilisées ultérieurement.

Cela dit, le problème de gestion d'énergie peut être formulé comme un problème d'optimisation globale sous contraintes.

IV.5.1. Problématique de l'optimisation de la gestion d'énergie

La source d'énergie électrique dans un véhicule hybride à pile à combustible est constituée de deux parties, la première est la source principale composée de la pile à combustible, la deuxième est la source secondaire constituée par les supercondensateurs, la fluence d'énergie entre le SYSPAC, la SSE et la machine électrique est assurée par deux convertisseurs de puissances DC-DC.

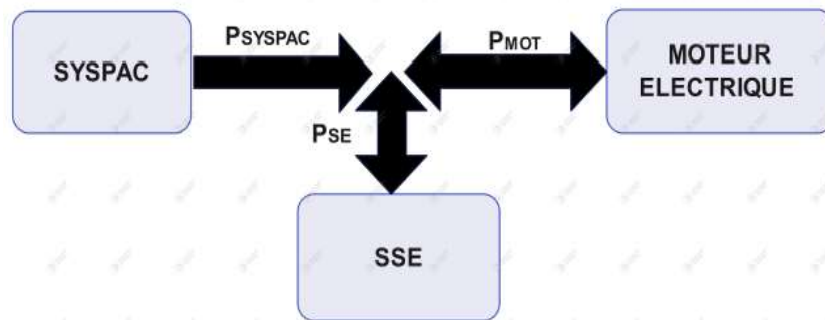


Figure IV. 4 : Schéma simplifié fluence d'énergie dans un groupe motopropulseur

Notre objectif d'optimisation de la gestion de l'énergie dans l'ensemble (pile à combustible, super-condensateurs et charge) est de minimiser l'énergie électrique fournie par la pile à combustible à la charge durant un cycle de conduite vitesse /temps.

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

$$P_{SYSPAC} + P_{SC} = P_{MOT}. \quad (IV. 1)$$

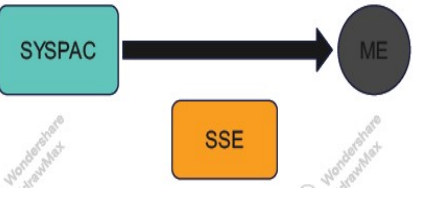
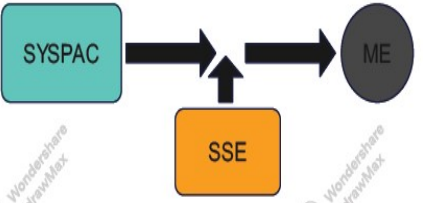
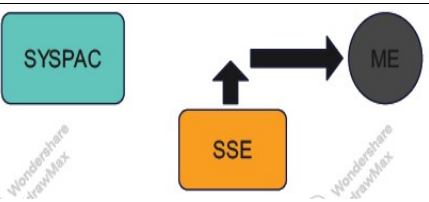
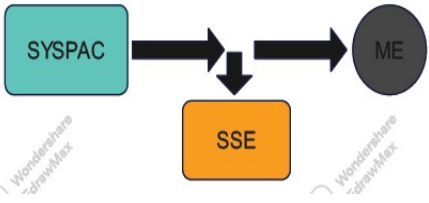
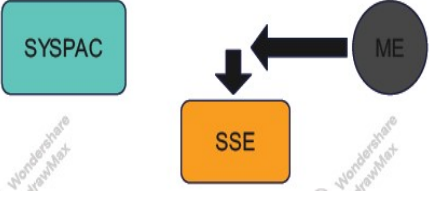
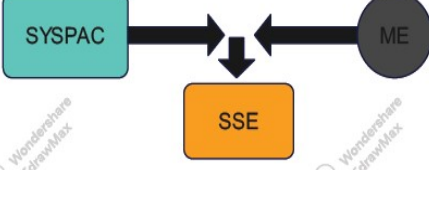
Les super-condensateurs interviennent en cas des fortes accélérations (pics), et à la récupération de l'énergie lors de freinage du véhicule. L'état de charge des super-condensateurs doit être ramené à une valeur de référence à la fin de chaque cycle de fonctionnement pour commencer un autre cycle de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

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

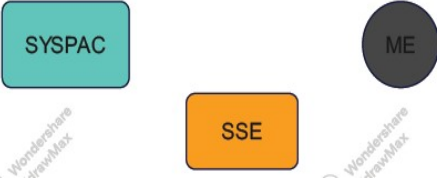
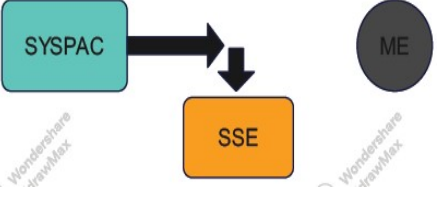
IV.5.2. Algorithme de stratégie de la commande dans un VH

Dans cette stratégie, nous distinguons les trois modes de fonctionnement possibles du véhicule, à savoir le mode arrêt, le mode traction et le mode freinage.

Tableau 4.1 : Flux énergétiques.

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

Chapitre IV : La gestion d'énergie

			la puissance du système PAC
Arrêt	$P_{ME} = 0$ $P_{SYSPAC} = 0$ $P_{SSE} = 0$		Aucune flux énergétique
	$P_{ME} = 0$ $P_{SYSPAC} > 0$ $P_{SSE} < 0$		Le système PAC recharge la source secondaire

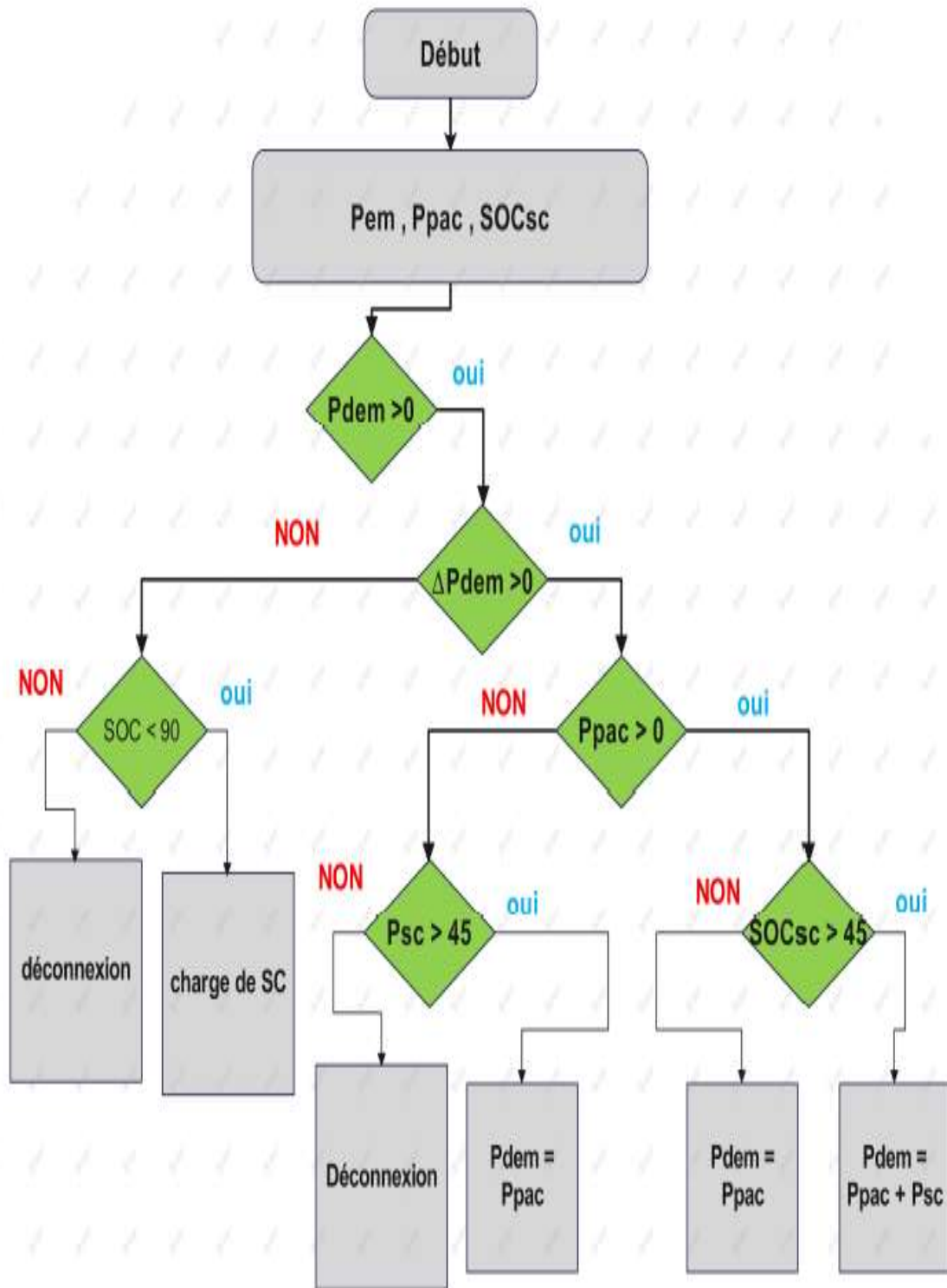


Figure IV. 5 : Algorithme de la gestion d'énergie

IV.6. Méthodes de gestion d'énergie

Dans notre cas, l'ajout d'une source auxiliaire disposant d'une forte puissance spécifique comme les super-condensateurs, permet de diminuer fortement les sollicitations en courant sur les batteries et ainsi augmenter les performances globales de la source de stockage (durée de vie, rendement, dynamique, autonomie, etc...). De plus, la présence de cette source d'énergie secondaire permet d'envisager des fonctionnalités supplémentaires, notamment en raison de sa réversibilité. Il devient alors possible de récupérer la totalité de l'énergie de freinage. Cette répartition doit satisfaire la demande de puissance du moteur électrique et respecter les contraintes électriques et énergétiques du système de stockage.

Ce système hybride nécessite une stratégie de gestion d'énergie adaptée afin d'exploiter au mieux le potentiel des différentes sources et afin d'utiliser efficacement l'énergie embarquée. Elle peut être basée sur des règles déterministes ou non, mais également sur des fonctions objectifs (durée de vie de la batterie, confort de conduite, consommation énergétique du véhicule, etc...). De nombreux travaux ont été effectués sur le sujet, on peut classer ces stratégies en deux principales catégories:

- Les stratégies basées sur des règles prédéfinies,
- Les stratégies basées sur l'optimisation.

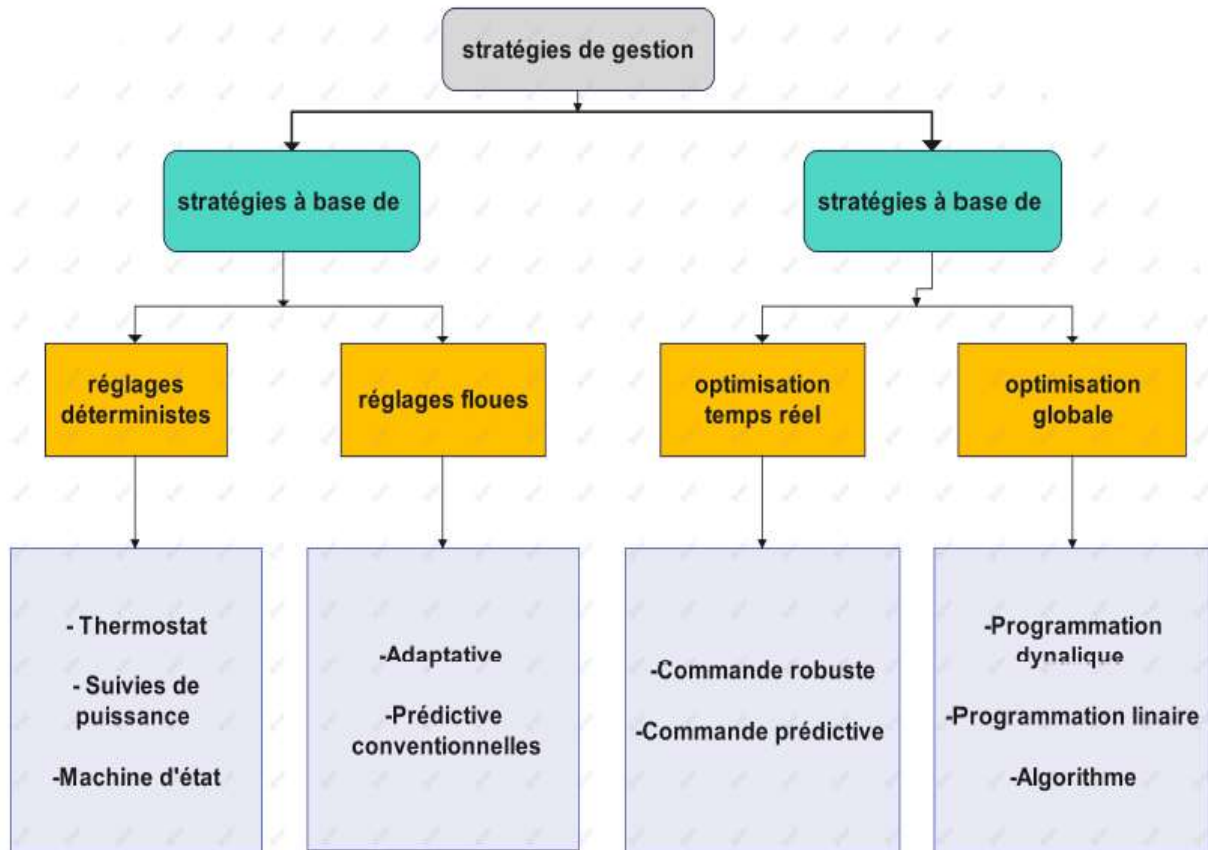


Figure IV. 6 : Classification des stratégies de gestion d'énergie

IV.7. Stratégies de gestion de l'énergie

Avec l'électrification de plus en plus présente dans les systèmes de transport et l'objectif est d'améliorer leur efficacité énergétique, La thématique de la gestion d'énergie est un sajes suscitant de plus en plus d'intérêt de la part des chercheurs et des industriels. Avec l'apparition des véhicules hybrides, on a vu apparaitre de nombreuses stratégies en vue d'optimiser au mieux la répartition de la puissance entre la source principale et l'élément de stockage d'énergie.

Dans la partie ci-dessous, nous allons présenter les principales stratégies, appliquées aux VEH [39].

Ces stratégies, comme présenté dans la **Figure IV.6** peuvent être classées en deux catégories: les stratégies à base de règles et les stratégies basées sur l'optimisation.

IV.7.1. 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 is 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: Règles déterministes: les règles sont fixées en lien direct avec l'objectif et c'est une stratégie simple à contrôler. On peut citer dans cette catégorie la méthode « Thermostat », utilisée par Di Wu et al pour la gestion de l'énergie d'un VH alimenté par une pile à combustible et un super-condensateur mises en parallèle. Dans ce cas, l'objectif est de minimiser la consommation de l'hydrogène. Pour cela, la pile doit fonctionner en son point de rendement optimal pour recharger le super-condensateur et maintenir ainsi le SOC de cette dernière entre deux valeurs limites.

C'est la méthode « suivie de puissance » qui est la plus exploitée. Cette méthode, en plus du fonctionnement de la batterie en mode Charge Sustaining, prend en compte la vitesse du véhicule. A faibles vitesses, la voiture roule en mode électrique et le moteur thermique peut fonctionner en dehors de son point de rendement optimal.

› Règles floues les règles sont définies au préalable et sont gérées à l'aide de la logique floue. Elles sont donc considérées comme une amélioration des règles déterministes. Sans entrer dans le détail du fonctionnement de ces méthodes, ces dernières tolèrent des imprécisions dans les mesures et sont facilement adaptables aux variations des valeurs initiales des règles [39].

IV.7.2. Stratégies à base d'optimisation

Dans ces stratégies, les objectifs tels que la consommation de carburant, les émissions de gaz et le SOC de la batterie, dans le cas des véhicules hybrides, 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 [39].

Cet algorithme contrôle le SOC d'une batterie et optimise la consommation de carburant d'un VEC Une autre méthode dite ECMS pour Equivalent Consumption Minimization Strategy, proposée par Mustardo et al, est basée sur un algorithme adaptatif. Cet algorithme utilise une fonction qui calcule l'équivalent de recharge de la batterie en consommation de carburant. La

consommation globale est égale à la somme de la consommation du VEH délivrée par le moteur thermique et l'équivalent délivré par le moteur électrique. Cette méthode ne nécessite pas de modèle prédictif, mais l'estimation de la consommation globale est peu précise avec prédiction au-delà de 20 secondes [39].

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 implementation 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 exploité, séparément, deux approches de programmation: la première était la programmation dynamique déterministe pour l'optimisation du dimensionnement des éléments de la source [39].

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.

IV.8. Système globale de la gestion d'énergie

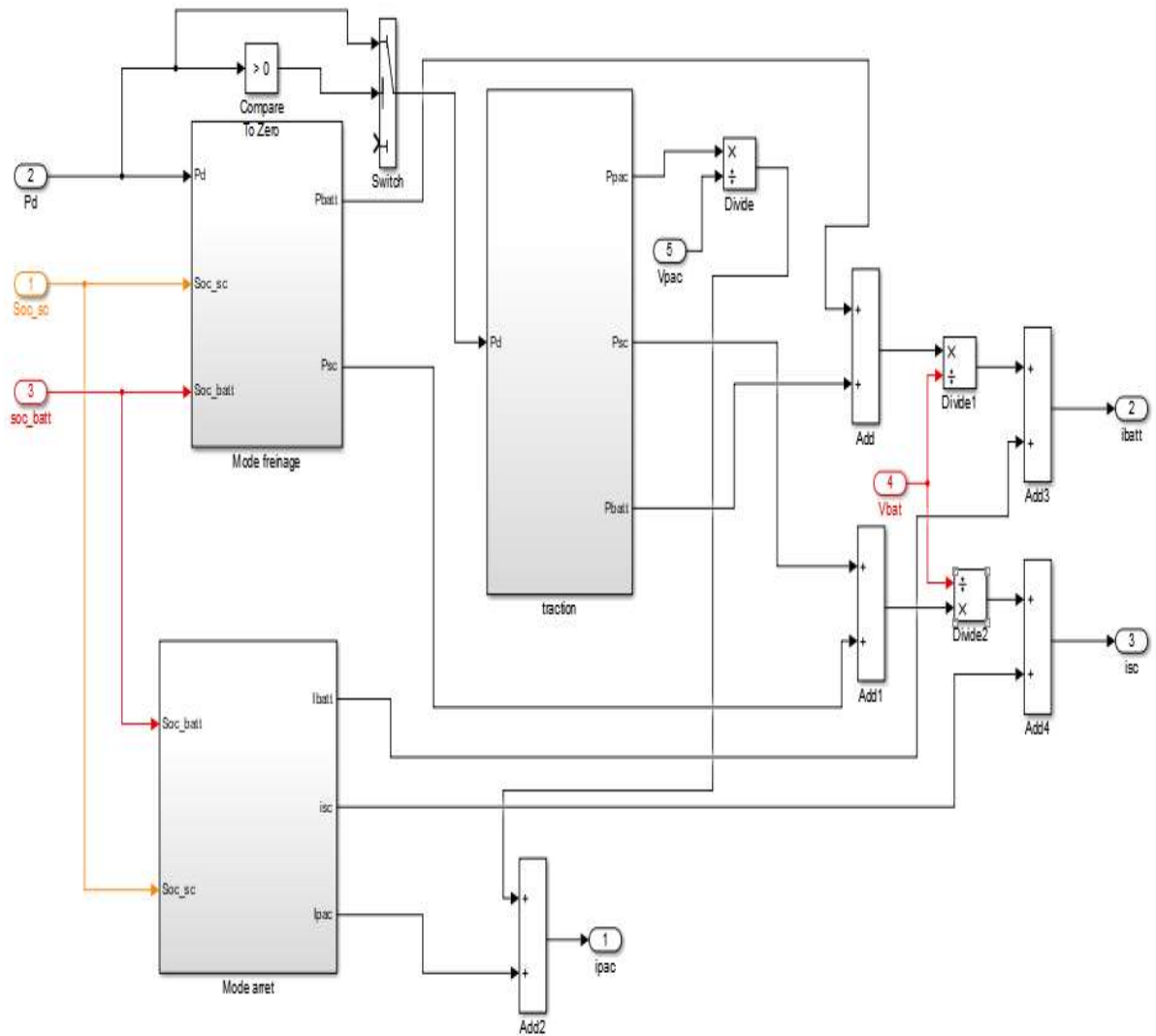


Figure IV. 7 : la gestion d'energie sous matlab simulink

IV.9. Résultats de simulation

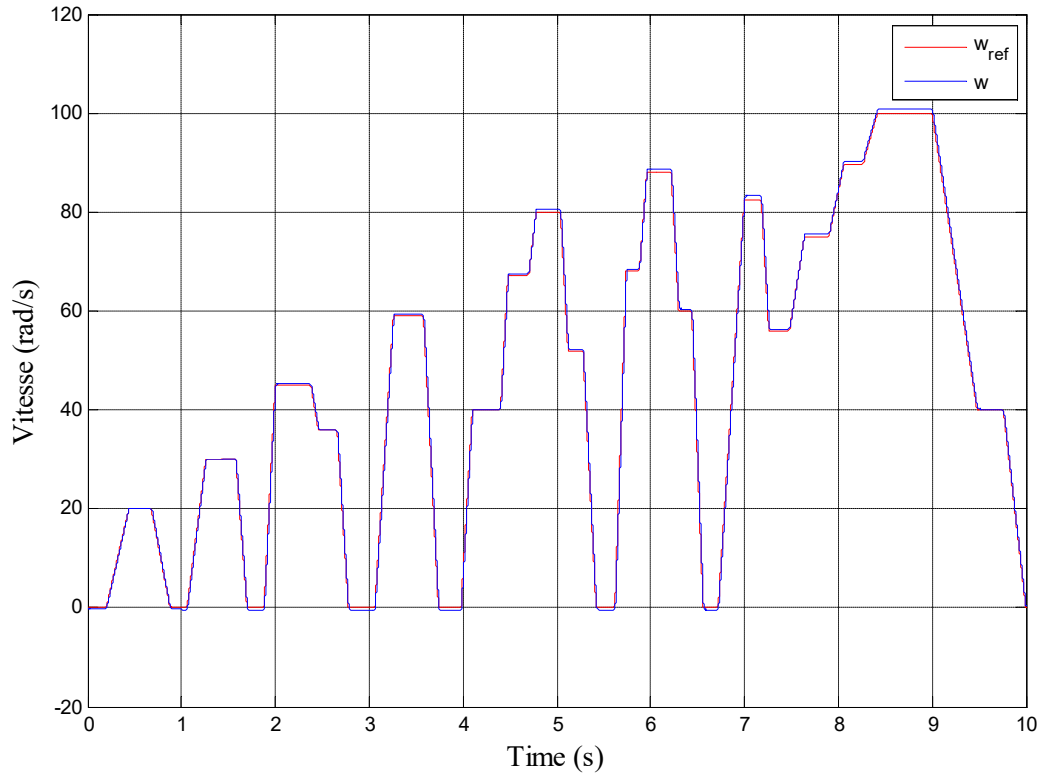


Figure IV. 8 : (W_{ref}) Vitesse de référence en km/h, (W) Vitesse du moteur électrique en km/h

La **Figure IV.8** représente la vitesse de référence du véhicule et la vitesse du moteur électrique en km/h. Nous avons choisi un profil de vitesse qui permet de voir les différents modes de fonctionnement du véhicule : traction, freinage et arrêt. Le modèle mécanique du véhicule étant basé sur la vitesse V et l'accélération g , ce profil détermine également les formes de couple moteur et de vitesse.

En comparant les deux vitesses, on constate que la vitesse du moteur suit parfaitement la vitesse de référence.

Les allures des **figures IV.9 et IV.10** expose les variations aux niveaux des courants i_d et i_q lors du changement de la vitesse du véhicule.

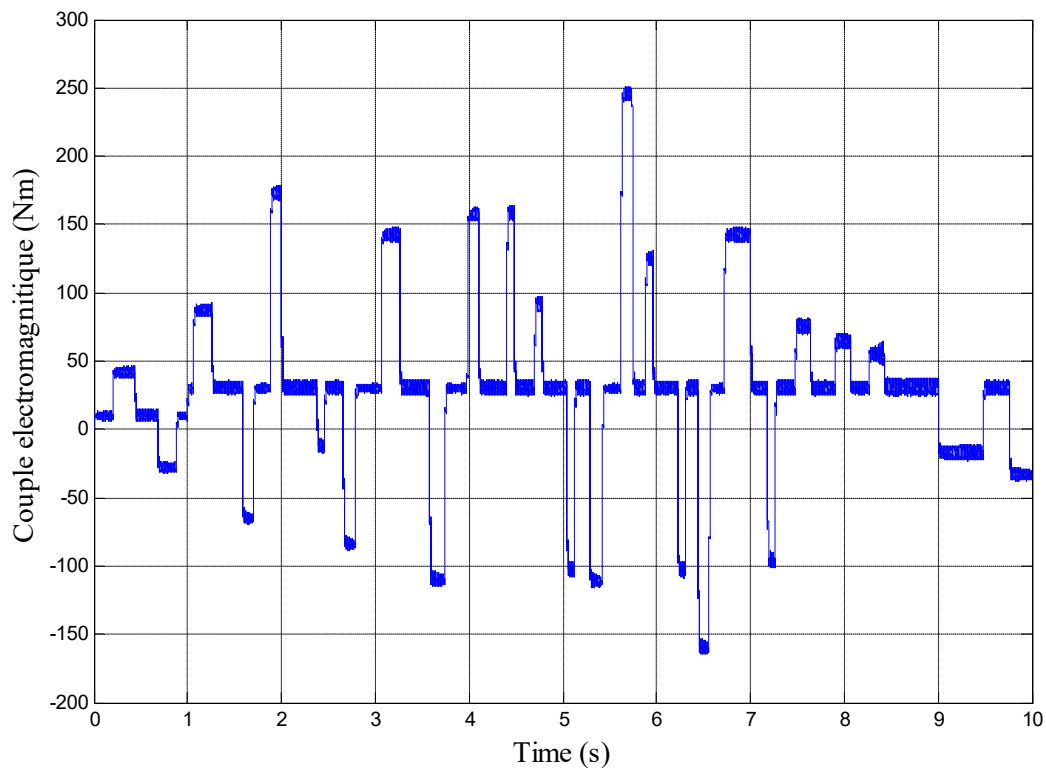


Figure IV. 11 : Couple électromagnétique.

La **Figure IV.11** correspond au couple électromagnétique, la réponse des deux composantes du courant statorique montre bien le découplage introduit par la commande vectorielle de la machine, le couple électromagnétique est directement proportionnel à i_q , ce qui est l'objectif de la commande vectorielle.

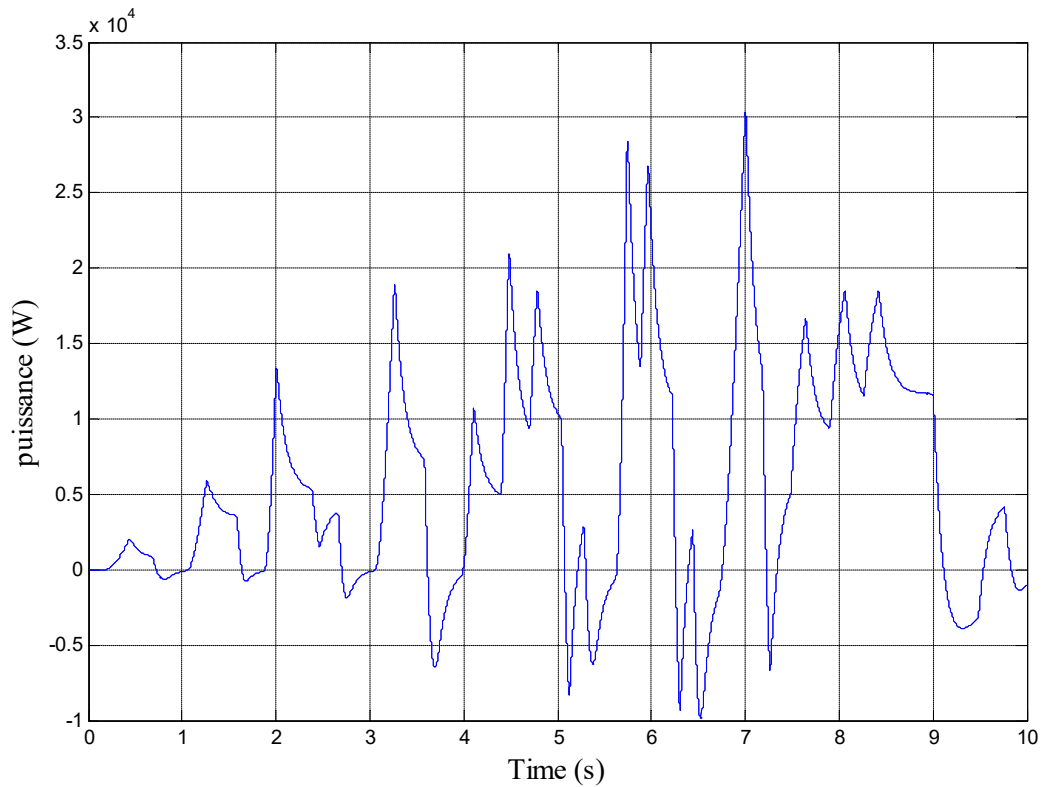


Figure IV. 12 : Profil de la puissance demandé

La **Figure IV.12** : montre l'allure de la puissance demandée par le véhicule par rapport au cycle de vitesse proposé, comprenant trois modes de fonctionnement : accélération, décélération et arrêt.

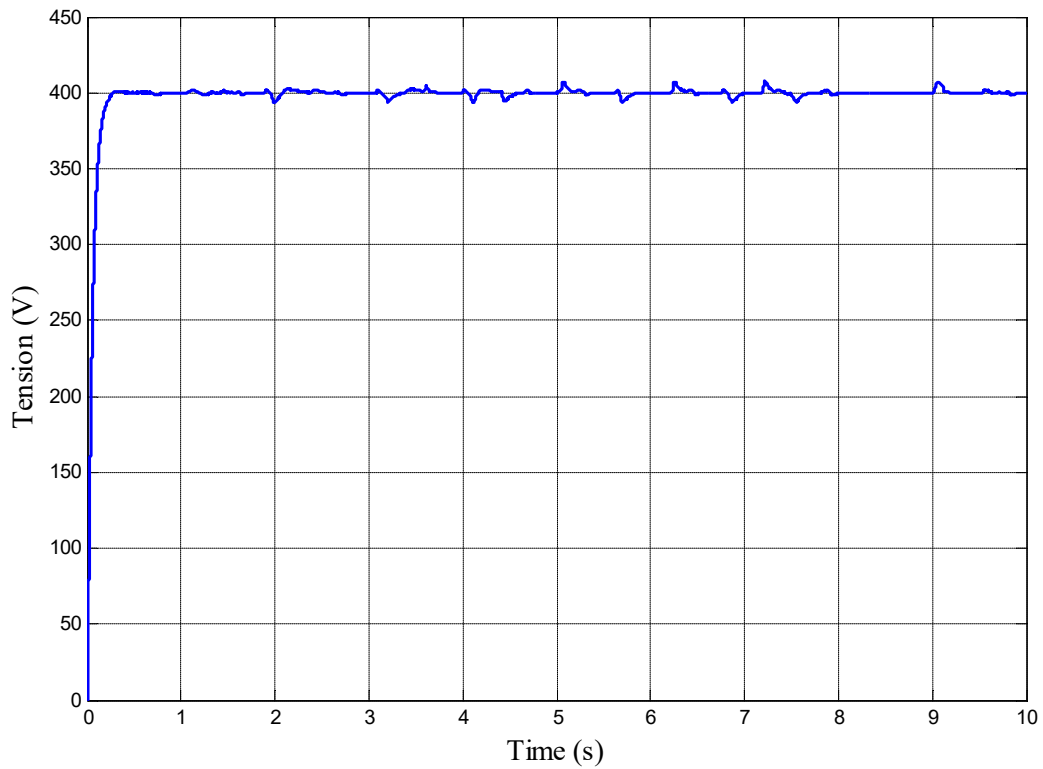


Figure IV. 13 : tension au niveau du bus continu

La **Figure IV.13** : montre le comportement de la tension au niveau du bus continue. Notez que la tension se stabilise après 0,30 seconde. C'est approximativement le temps de réponse obtenu. La valeur maximale est de 400 V pendant toutes les phases de fonctionnement.

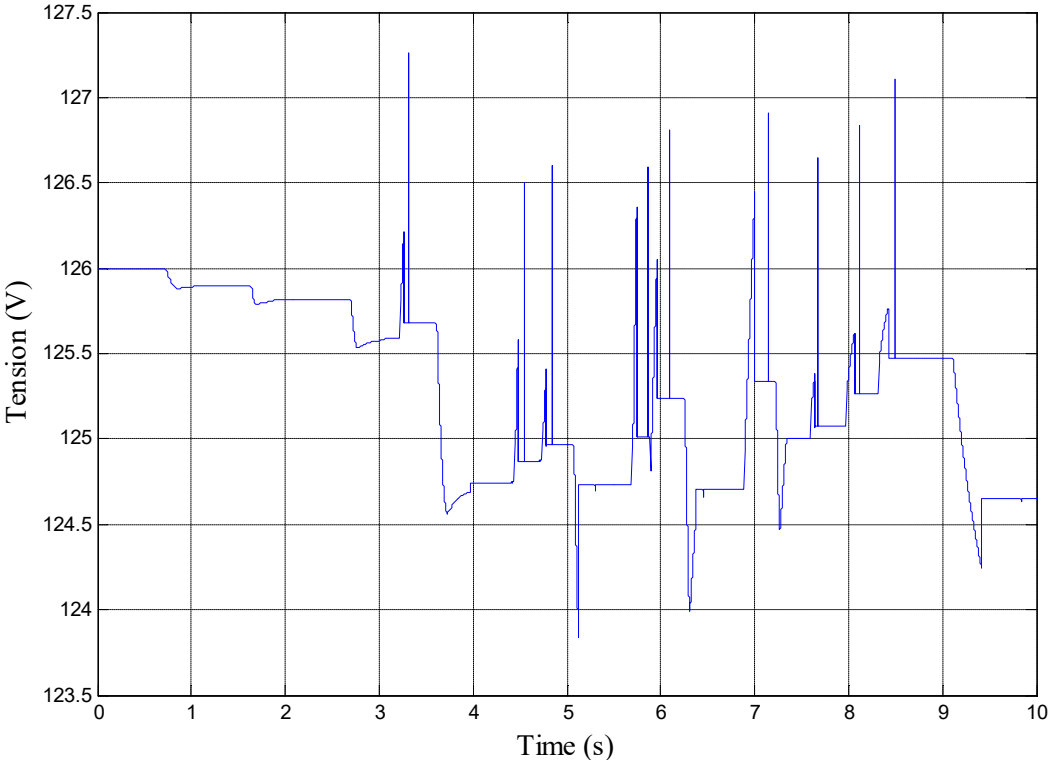


Figure IV. 14 : Tension du super condensateur

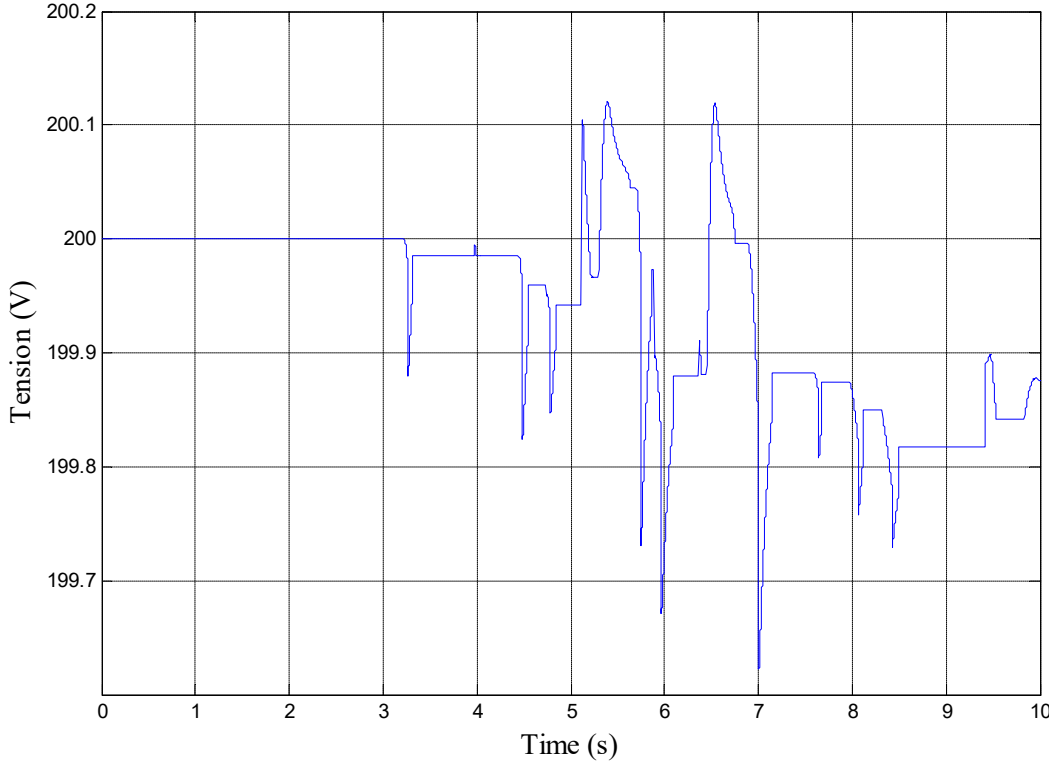


Figure IV. 15 : Tension de la batterie

Les courbes des **figures IV.15** et **IV.14**, qui représentent les tensions de la batterie et du SC, montrent que le régulateur de suralimentation intervient pour maintenir la tension presque constante sur le rapport cyclique.

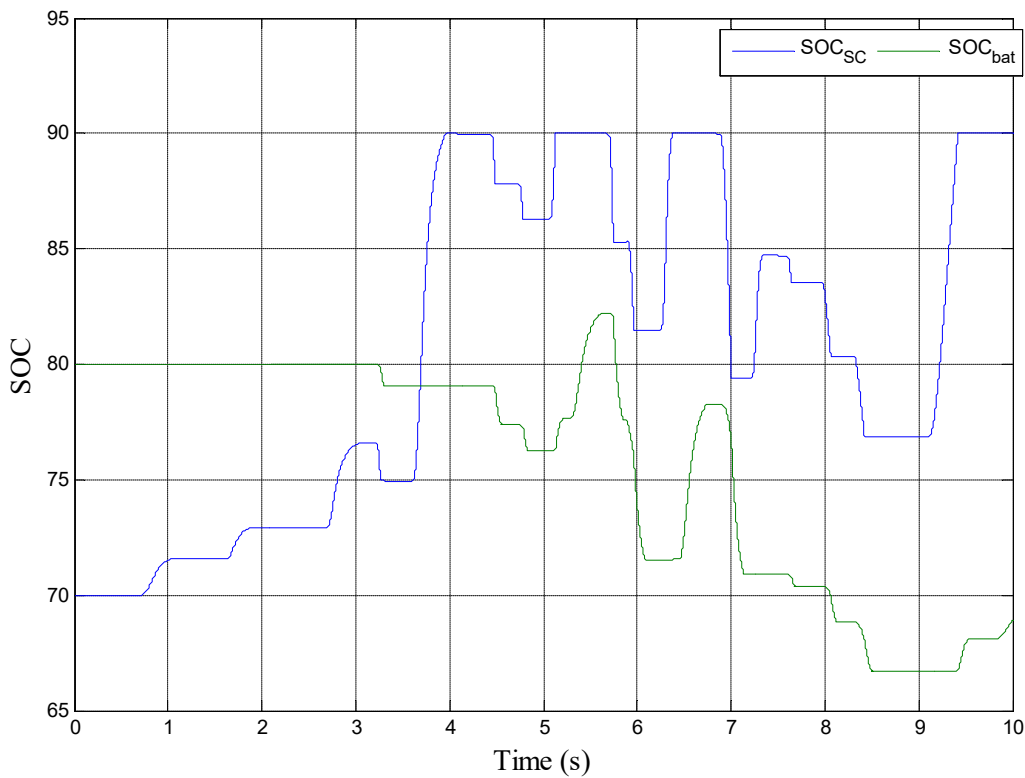


Figure IV. 16 : État de charge des SCs et la batterie

La **Figure IV.16** : montre les caractéristiques SOC du SC et de la batterie sont indiquées, en notant qu'ils sont protégés entre deux niveaux de charge, décharge pendant le fonctionnement du moteur, correspondant à une diminution du SOC, pour alimenter le moteur électrique, et charge pendant le fonctionnement du générateur correspondant pour augmenter les socs, et récupérer l'énergie cinétique des roues.

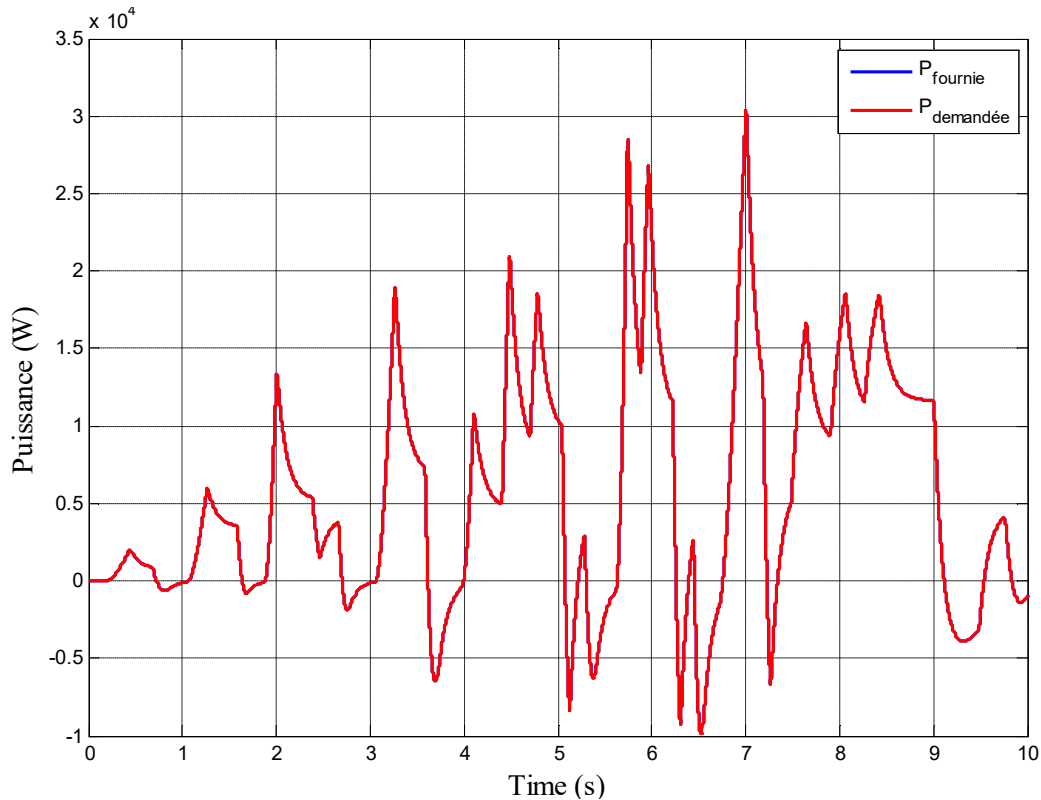


Figure IV. 17 : conservation des puissances

La **Figure IV.17** : montre le comportement des puissances (puissance demandée par le moteur et celle fournie par les sources), la puissance positive correspond à celle donnée au moteur électrique, par contre la puissance négative est celle récupérée aux moments de freinage. En mode de traction, la PAC assure la compensation et fournie de l'énergie. Cependant, en mode d'arrêt et cas de besoin en énergie, elle charge les sources secondaires.

IV.10. Conclusion

Un véhicule hybride à pile à combustible fournit de l'énergie pour la traction par via un système pile à combustible associé à un élément de stockage de l'énergie électrique super-condensateur par l'intermédiaire de convertisseurs statiques de puissance. La gestion de l'énergie à bord du véhicule est une phase nécessaire dans le but de minimisation de l'énergie fournie par la pile à combustible, et par suite la minimisation du combustible consommé qui est l'hydrogène. Ainsi que la présentation des résultats de simulation du système global étudié.

On constate l'intérêt de la gestion de puissance dans ce système qui permet de gérer les sources d'énergies et charger la source secondaire, et d'assurer le fonctionnement de système sans interruption.



Conclusion Générale

Conclusion General

Durant ces dernières années le réchauffement climatique est au cours des débats écologiques, et les véhicules routiers avec leurs émissions des gaz carbonique CO₂, sont mis de l'avant comme l'une des causes majeures de ce phénomène. Ainsi, depuis peu, des nouvelles structures alternatives aux véhicules conventionnels, qui allient les avantages des propulsions thermique des propulsions thermique et électrique, sont mises en place, ces nouveaux véhicules sont nommés véhicule hybride. C'est l'étude de ces derniers qui a fait l'objet de notre travail.

L'objectif principal de ce travail était l'étude d'un système hybride à pile à combustible et super-condensateurs .après un état de l'art dans le domaine des véhicules a PAC, il est apparu que l'hybridation de système pile à combustible était largement adoptée.

Ce mémoire a été organisé en cinq chapitres :

Dans un premier lieu, nous nous sommes opté à la présentation d'un état d'art de véhicule électrique, nous avons présenté les différents types de cette dernière et leur fonctionnement et un bref sur les composants nécessaires au fonctionnement du véhicule électrique.

Le deuxième chapitre a eu objectif de présenter les différents organes de véhicule électrique .on a commencé par les structures de VH, ainsi nous avons donné une description générale de chaque élément, à savoir les sources d'énergies (pile à combustible, batteries et super-condensateurs), les convertisseurs statiques (hacheurs et onduleur), la machine électrique.

Dans Le troisième chapitre est consacré à la modélisation de notre système étudié, de chaque élément, à savoir les sources d'énergies (batteries, la pile à combustible et super-condensateurs), les convertisseurs statiques (hacheurs et onduleur), la machine à aimant permanent et le véhicule électrique.

Le chapitre quatre a porté sur la gestion d'énergie et ses différents méthodes et un organigramme qui a procuré à gérer la distribution de l'énergie dans le véhicule.

Les résultats de notre système étudié sous le logiciel MATLAB Simulink sont présentés et discutés dans le dernier chapitre, afin de présenter la gestion de puissance et le dimensionnement de système étudié.

Liste des figures

<i>Figure I. 1: Le système de propulsion électrique.....</i>	<i>4</i>
<i>Figure I. 2 : Première voiture électrique au monde.</i>	<i>4</i>
<i>Figure I. 3 : Deux voitures électriques des postes parisiennes (1904).....</i>	<i>5</i>
<i>Figure I. 4 : la voiture électrique « jamais contente » créée par Camille Jenatzy en 1900. ..</i>	<i>5</i>
<i>Figure I. 5 : La Buick Skylark de GM (General Motors).....</i>	<i>6</i>
<i>Figure I. 6 : La Prius (Toyota 1997)</i>	<i>6</i>
<i>Figure I. 7 : Exemple d'architecture de véhicule à pile à combustible hybride.</i>	<i>12</i>
<i>Figure I. 8 : Principe de la réaction catalytique dans l'électrode volumique.....</i>	<i>12</i>
<i>Figure I. 9 : Structure de la chaîne de traction dans un VE.....</i>	<i>13</i>
<i>Figure I. 10 : Toyota Prius (NHW20 depuis 2003).....</i>	<i>17</i>
<i>Figure I. 11 : Schema de principe de la Toyota Prius II.....</i>	<i>17</i>
<i>Figure I. 12 : Toyota Prius rechargeable.....</i>	<i>18</i>
<i>Figure I. 13 : Architecture Toyota Prius rechargeable.</i>	<i>18</i>
<i>Figure I. 14 : Mercedes S400 Blue HYBRID.....</i>	<i>19</i>
<i>Figure I. 15 : Mercedes S400 BlueHYBRID.....</i>	<i>19</i>
<i>Figure II. 1: Schéma de principe d'une voiture hybride (Source Toyota).....</i>	<i>20</i>
<i>Figure II. 2 : Configuration Série.</i>	<i>21</i>
<i>Figure II. 3 : Configuration Parallèle.....</i>	<i>22</i>
<i>Figure II. 4 : Structure parallèle directe.</i>	<i>22</i>
<i>Figure II. 5 : Structure parallèle à deux convertisseurs.....</i>	<i>23</i>
<i>Figure II. 6 : Structure parallèle à un convertisseur.....</i>	<i>23</i>
<i>Figure II. 7 : Convertisseur Boost de la PAC.</i>	<i>26</i>
<i>Figure II. 8 : Convertisseur Buck/Boost.</i>	<i>26</i>
<i>Figure II. 9 : Principe d'un accumulateur électrochimique.</i>	<i>27</i>
<i>Figure II. 10 : Vue éclatée d'une batterie nickel-cadmium Ni-Cd industrielle.....</i>	<i>28</i>
<i>Figure II. 11 : Accumulateur nickel-hydrure métallique Ni-MH en géométrie cylindrique.</i>	<i>30</i>
<i>Figure II. 12 : Composition interne d'un SC.....</i>	<i>32</i>
<i>Figure II. 13 : Architecture d'un système à pile à combustible.</i>	<i>34</i>

<i>Figure III. 1 : Schéma équivalent d'une MSAP dans le repère (a-b-c).</i>	36
<i>Figure III. 2 : Schéma équivalent d'une MSAP dans le repère (d-q).</i>	39
<i>Figure III. 3 : Schéma bloc de la machine synchrone à aimants permanents.</i>	41
<i>Figure III. 4 : Représentation du modèle découplé de la MSAP.</i>	42
<i>Figure III. 5 : Schéma bloc d'une régulation de vitesse de la MSAP alimentée en tension et commandée par 'orientation du flux.</i>	43
<i>Figure III. 6 : Schéma bloc de compensation.</i>	44
<i>Figure III. 7 : Principe de découplage par compensation.</i>	45
<i>Figure III. 8 : Représentation de l'onduleur de tension triphasé.</i>	46
<i>Figure III. 9 : Schéma de principe d'un convertisseur Boost.</i>	47
<i>Figure III. 10 : convertisseur Boost S bloqué.</i>	48
<i>Figure III. 11 : convertisseur Boost S ouvert.</i>	48
<i>Figure III. 12 : Formes d'ondes courant/tension dans un Convertisseur Boost.</i>	49
<i>Figure III. 13 : Architecture d'un convertisseur Buck-boost idéal.</i>	49
<i>Figure III.14:convertisseur buck-boost S Ouverte.</i>	49
<i>Figure III. 15 : convertisseurs buck-boost S fermé.</i>	50
<i>Figure III. 16 : Formes d'ondes courant/tension dans un convertisseur Buck-Boost.</i>	50
<i>Figure III. 17 : schéma électrique équivalent de la batterie.</i>	51
<i>Figure III. 18 : Bilan de tension de sortie de la pile à combustible.</i>	53
<i>Figure III. 19 : Représentation électrique de la PEMFC.</i>	53
<i>Figure III. 20 : Caractéristique Tension-Densité de courant.</i>	57
<i>Figure III. 21 : Caractéristique Puissance-Densité de courant.</i>	57
<i>Figure III. 22 : Modèle de R. Bonert et L. Zubieta.</i>	58
<i>Figure III. 23 : Modèle de la cellule sans branche lente.</i>	58
<i>Figure IV. 1 : plan de ragon.</i>	62
<i>Figure IV. 2 : Principe d'hybridation des sources de stockage hybrides.</i>	63
<i>Figure IV. 3 : Principe d'hybridation PAC/Source de puissance.</i>	64
<i>Figure IV. 4 : Schéma simplifié fluence d'énergie dans un groupe motopropulseur.</i>	65
<i>Figure IV. 5 : Algorithme de la gestion d'énergie.</i>	68
<i>Figure IV. 6 : Classification des stratégies de gestion d'énergie.</i>	70

<i>Figure IV. 7 : la gestion d'énergie sous matlab simulink.</i>	73
<i>Figure IV. 8 : (W_{ref}) Vitesse de référence en km/h, (W) Vitesse du moteur électrique en km/h.</i>	74
<i>Figure IV. 9 : Courant direct</i>	75
<i>Figure IV. 10 : courant quadratique</i>	75
<i>Figure IV. 11 : Couple électromagnétique</i>	76
<i>Figure IV. 12 : Profil de la puissance demandé.</i>	77
<i>Figure IV. 13 : tension au niveau du bus continu.</i>	78
<i>Figure IV. 14 : Tension du super condensateur.</i>	79
<i>Figure IV. 15 : Tension de la batterie.</i>	79
<i>Figure IV. 16 : État de charge des SCs et la batterie</i>	80
<i>Figure IV. 17 : conservation des puissances</i>	81

Liste des tableaux

<i>Tableau 1. 1 : Les différents types de voiture électriques.</i>	<i>7</i>
<i>Tableau 1. 2 : principaux modes de fonctionnement de vehicule électrique.</i>	<i>10</i>
<i>Tableau 2. 1 : Différents types de piles à combustible.</i>	<i>33</i>
<i>Tableau 4. 1 : Flux énergétiques.</i>	<i>66</i>

Références

1. D. Benoudjit, Contribution à l'optimisation et à la commande d'un système de propulsion pour véhicule électrique, Thèse doctorat, Université de Batna, Janvier 2010.
2. A. Daanoune, Contribution à l'Etude et à l'Optimisation d'une Machine Synchrone à Double Excitation pour Véhicules Hybrides, Thèse doctorat, Université de Grenoble, décembre 2012.
3. Abdeljalil Daanoune. Contribution à l'Etude et à l'Optimisation d'une Machine Synchrone à Double Excitation pour Véhicules Hybrides. PhD thesis, 2012.
4. F. Mohammadi, "Electric Vehicle Battery Market Analysis: Lead Acid," no. August 2018, 2019.
5. B. Chauchat, _Chargeur de batteries intégré pour véhicule électrique, _ Ph.D. dissertation, Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG, 1997.
6. M.-O. Metais and Y. Perez, _Infrastructure de recharge pour véhicules électriques: quels dés pour les territoires? _ 2021.
7. J.-M. Proulx and M. en Ingénierie, _Évaluation de l'impact potentiel de l'implantation d'un réseau de bornes de recharge rapide pour véhicules électriques sur les autoroutes du québec, _ Ph.D. dissertation, Université de Sherbrooke, 2014.
8. GARCIA ARREGUI M., TURPIN C., ASTIER S., Groupe électrogène pour aéronef à pile à combustible hybridée par super-condensateurs, Conférence EF 2007, Toulouse, (Sept. 2007).
9. THOUNTHONG P., RAËL S. and DAVAT B., Supercapacitors as an energy storage for fuel cell automotive hybrid electrical system, International Journal of Electrical Engineering in Transportation, Vol.1, No.1, (2005).
10. AZIB T., BETHOUX O., REMY G., and MARCHAND C., Structure and Control Strategy for a Parallel Hybrid Fuel Cell/Supercapacitors Power Source, IEEE VPPC'09 in Dearborn, Michigan, (Sept 7-11. 2009), in press.
11. T.VANDEWATTYNE, Q. DEPOERS, 2012 <<Les voitures hybrides>>.
12. B.AMROUCHE <<Étude et commande des véhicules hybrides parallèles>>. Thèse de Master, université A.MIRA Bejaïa.

13. S.GUENIDI <<Modélisation, commande et gestion de l'énergie d'un véhicule électrique hybride>>. <https://www.researchgate.net/publication/233414895>, 2011.
14. T.MESBAHI <<Influence des stratégies de gestion d'une source hybride de véhicule électrique sur son dimensionnement et sa durée de vie par intégration d'un modèle multi-physique>>. Thèse de Doctorat, université centrale de Lille, 2016.
15. Sabrina Zaouzaou, Sabrina Meziani Sabrina, A Charikh, et al. Etude et simulation des convertisseurs statiques existant dans un véhicule électrique. PhD thesis, Université Abderrahmane Mira, 2017.
16. Jack Robert, Jean Alzieu "Accumulateurs - Accumulateurs au plomb" .
17. Gwenaëlle Sou_ran. Dimensionnement de la chaîne de traction d'un véhicule électrique hybride basé sur une modélisation stochastique de ses pro_ls de mission . PhD thesis, 2012.
18. D.Sury. La voiture électrique : révolution ou fausse bonne idée. Master's thesis.
19. P. Thounthong, S. Raël, and B. Davat, "Supercapacitors as an energy storage for fuel cell automotive hybrid electrical system Supercapacitors as an energy storage for fuel cell automotive hybrid electrical system," n Proc. 1st Eur. Symp. Supercap. Appl.
20. K. Mensah-Darkwa, C. Zequine, P. K. Kahol, and R. K. Gupta, "Supercapacitor energy storage device using biowastes: A sustainable approach to green energy," Sustain., vol. 11, no. 2, 2019.
21. P. García, J. P. Torreglosa, L. M. Fernández, and F. Jurado, "Control strategies for high-power electric vehicles powered by hydrogen fuel cell, battery and supercapacitor," Expert Syst. Appl., vol. 40, no. 12, pp. 4791–4804, 2013.
22. R. Ortega, F. Member, and A. Sasongko, "Energy Management of Fuel Cell / Battery / Supercapacitor Hybrid Power Sources Using Model Predictive Control," vol. 10, no. 4, pp. 1992–2002, 2014.
23. P. Pillay, R. Krishnan, « Modeling of permanent magnet motor drive », IEEE transactions on industrial electronics, Vol. 35, N°. 4, November, 1988.
24. T. H. Liu, C. M. Young, C. H. Liu, « Microprocessor based controller design and simulation for a permanent magnet synchronous motor drive », IEEE Transaction on industry applications, Vol. 5, N°. 4, pp.516-523 November, 1988.

25. A. Benbrahim, « Commande prédictive généralisée d'une machine synchrone à aimants permanents », Mémoire de Magister, Université de Batna, 18 Juin 2009.
26. K. Khaldi, « Diagnostic et commande d'une machine synchrone à aimants permanents », Mémoire de Magister, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, 01 Février 2006.
27. J. LACHAIZE, « Etude des stratégies et des structures de commande pour le pilotage des systèmes énergétiques à Pile à Combustible (PAC) destinés à la traction ». Thèse de doctorat, institut national polytechnique de Toulouse, 2004.
28. A. Nait Seghir, « Contribution à la commande adaptative et neuronale d'une machine synchrone à aimants permanents », Thèse de Doctorat d'Etat, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, 16 Décembre 2007.
29. B. Nahid Mobarakeh, « Commande vectorielle sans capteur mécanique des machines synchrones a aimants : méthodes, convergence, robustesse, identification "en ligne" des paramètres », Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, 21 décembr.
30. H. Amrous, « Commandes adaptatives d'une machine synchrone a aimants permanents », Mémoire de Magister, Ecole Nationale Supérieure Polytechnique, Alger, Juillet 2009.
31. K. Benmansour, « Contributions à l'application des commandes robustes et intelligentes à une MSAP et de la théorie des systèmes dynamiques hybrides à un convertisseur », Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, 02 Juillet 2006.
32. H. Abdellaoui, « Etude expérimentale de la position rotorique d'un moteur synchrone à aimants permanents par variables électriques », Mémoire de Magister, Université de Tizi Ouzou.
33. A. Boumediene, « Recherche et développement de nouvelles approches de commandes d'une machine synchrone autopilotée alimentée en tension », Thèse de Doctorat d'Etat, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, 15 Décembre 2007.
34. N. Choug, « Etude de la robustesse des contrôleurs flous d'une machine synchrone à aimants permanents avec pilotage vectoriel », Mémoire de Magister, Université de Batna, 2011.
35. G.Grellet, G.Clerc, « Actionneur Electriques, Principes, Modèles, commande », Eyrolles, 1997.

- 36.** M.S. Merzoug, « Etude comparative des performances d'un DTC et d'un FOC d'une Machine synchrone à aimants permanents », Mémoire de Magister, Université de Batna, 15 Décembre 2011.
- 37.** A. Azaiz, Y. Ramdani, A. Meroufel, « design of controllers ensuring the regulation of currents of the decoupled field orientation control applied to a pms motor », Journal of Electrical Engineering, Vol 8, N°1, 2008.
- 38.** H. Gualous, R. Gallay, A. Berthon «Utilisation des super-condensateurs pour le stockage de l'énergie embarquée : applications transport, Maxwell Technologies» S. A janvier 2004.
- 39.** Halim, AZZI. *Etude et modelisation d'une a combustible*. Bejaia : s.n., 2016.
- 40.** P. Thounthong, S. Raël, and B. Davat, "Supercapacitors as an energy storage for fuel cell automotive hybrid electrical system Supercapacitors as an energy storage for fuel cell automotive hybrid electrical system," n Proc. 1st Eur. Symp. Supercap. Appl.

Annexe

❖ Paramètres de la cellule PEMFC

Paramètres	Symboles	Valeurs	Unité
Constantes pour simuler la surtension d'activation	B	0.0477	A ⁻¹
Constantes pour simuler la surtension d'activation	C	0.0136	V
constante de faraday	F	96485.33	C/mol
Constante temps d'hydrogène	τ_{H_2}	3.37	S
Constante de soupape d'hydrogène	K_{H_2}	$4.22 \cdot 10^{-5}$	Kmol(at s)
Constante de modélisation	r_{H_2O}	1.168	
Constante de modélisation	K_r	$2.2802 \cdot 10^{-7}$	Kmol(at s)
Constante temps d'oxygène	τ_{O_2}	6.74	S
Constante de soupape d'oxygène	K_{O_2}	$2.1 \cdot 10^{-5}$	Kmol(at s)
Constante temps d'oxygène	τ_{H_2O}	18.418	S
Résistance interne de la PAC	R_{pac}	0.003	OHM
Température absolue	T_{pac}	343	K
Tension de la cellule	E_0	0.6	V
Constante universelle des gaz	R	8.3145	J/(mol.K)
Volume de l'anode	V_{an}	150	M ³

❖ *Paramètres de la loi de tension*

α_1	1.229
α_2	$8.5 \cdot 10^{-4}$
α_3	$4.3085 \cdot 10^{-5}$
β_1	-0.9514
β_2	$3.12 \cdot 10^{-4}$
β_3	$-1.87 \cdot 10^{-4}$
β_4	$7.4 \cdot 10^{-5}$

❖ *Paramètres de la pile à combustible*

paramètres	Symboles	Valeurs	unités
Puissance	P_{pac}	17	Kw
Tension	V_{pac}	200	V

❖ *Caractéristiques des batteries*

Tension	200 V
Etat de charge initiale	80 Ah
Courant Max	77 A
Puissance MAX	15 kW

❖ *Caractéristiques de moteur*

Fréquence	50Hz
Inductance cyclique statorique d'axe direct 'd '	0.00065 μ H
Inductance cyclique statorique d'axe direct 'q '	0.00065 μ H
Flux induit par les aimants permanents	0.19 wb
Nombre de paires de pôles	4
Coefficient de frottement	1.4e-3 Nm.s
Moment d'inertie	0.1 Kg.m ²
Résistance d'un enroulement statorique	0.05 Ω

❖ *Caractéristiques de super condensateur*

Capacité constante	8.66 F
Résistance interne	0.17 Ω
capacité spécifique	0.95 F.v ⁻¹