



**DEPARTEMENT DU SECOND CYCLE**

**FILIERE**

**ELECTROTECHNIQUE**

**MEMOIRE**

Présenté en vue de l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'État

Gestion de l'énergie d'un système hybride renouvelable FC-PV-SC pour une application embarqué.

**Spécialité**

Production Electrique et Energie Renouvelables

**Par**

FAROU Meriem / DZIRI Asma

**Sous la direction de :**

TEGANI Ilyes

**Grade**

MCB

**Établissement d'affiliation**

ESTI Annaba

**Devant le jury**

**Président :**

Pr.

ESTI Annaba

**Examineurs :**

MCB

ESTI Annaba

MCB

ESTI Annaba

# Remerciements:

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

*Nous remercions tout particulièrement nos parents et nos frères, pour leur soutien inconditionnel au cours de ces longues années d'études.*

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

*Nous adressons nos chaleureux remerciements à....., .....et ....., qui nous fait l'honneur d'accepter d'examiner ce travail.*

**Résumé** Le présent travail s'intéresse tout particulièrement à la gestion de l'énergie d'un véhicule électrique hybride. Le modèle proposé est alimenté par un pack de pile à combustible, qui représente la source d'alimentations primaire du véhicule, et afin d'augmenter son 'scale range' nous avons opté pour une seconde source d'énergies écologique qui est la source photovoltaïque. Comme tout autre véhicule l'intégration d'une source de stockage de l'énergie est indispensable, quoique la batterie Li-ion qui est la source de stockage la plus répandue présente toujours des contraintes sur la performance du fonctionnement des voitures électriques, c'est pour cela que notre choix s'est dirigé vers une source de stockage plus promettant qui est le super condensateur. Toutes ses sources d'énergie ainsi leurs convertisseurs associés, ont été rigoureusement dimensionnés et modélisés selon un cahier de charge bien défini. Parmi les problèmes qui affrontent toujours à la performance des véhicules électrique, le problème de la commande et de la gestion d'énergie. Dans ce travail une des nouvelles techniques de commande qui est la commande par platitude a été utilisé. Les résultats de simulations montrent que le contrôle proposé basé sur la théorie de platitude permet d'avoir une efficacité énergétique élevée tout en gardant la stabilité du système durant les différents régimes de fonctionnement du véhicule étudié.

**Abstract** This work is particularly interested in the energy management of a hybrid electric vehicle. The proposed model is powered by a fuel cell pack, which represents the vehicle's primary power source, and in order to increase its 'scale range' we have opted for a second ecological energy source which is the photovoltaic source. Like any other vehicle the integration of an energy storage source is essential, although the Li-ion battery which is the most answered storage source always presents constraints on the performance of the operation of electric cars, it is why our choice went to a more promising storage source which is the super capacitor. All its energy sources and their associated converters have been rigorously dimensioned and modeled according to well-defined specifications. Among the problems that still face the performance of electric vehicles, the problem of control and energy management. In this work one of the new control techniques which is the flatness control was used. The simulation results show that the proposed control based on the flatness theory allows for high energy efficiency while maintaining the stability of the system during the different operating modes of the vehicle studied.

## Table de matière

Remerciement .....	II
Résumé.....	III
Abstract .....	III
Introduction générale.....	1
Chapitre I Principes fondamentaux et sources d'alimentation des véhicules électrique.....	3
I.1. Introduction .....	4
I.2. Principes fondamentaux du véhicule électrique .....	5
I.2.1. Historique et description générale du véhicule électrique .....	5
I.2.2. La puissance de traction .....	8
I.2.3. Configurations principales des VE.....	11
I.2.4. Véhicule hybride .....	18
I.2.5. Machines électriques dans un VE et leurs contrôleurs .....	20
I.3. Sources d'alimentation des véhicules électriques .....	24
I.3.1. Véhicule à pile à combustible .....	24
I.3.2. Supercondensateurs .....	40
I.3.3. Véhicule en utilisant une source photovoltaïque.....	47
I.4. Conclusion.....	52
Chapitre II Dimensionnement et conception des convertisseurs associés.....	53
II.1. Introduction .....	54
II.2. Modélisation des convertisseurs associés.....	54
II.3. Dimensionnement du moteur du véhicule électrique .....	59
II.4. Dimensionnement des cellules solaires .....	64
II.5. Dimensionnement de Pack FC.....	67
II.6. Dimensionnement des supercondensateurs .....	69
II.7. Dimensionnement du bus continu et convertisseurs associés aux sources .....	72
II.7.1. Convertisseur Boost .....	73
II.7.2. Convertisseur Buck-Boost .....	78
II.8. Conclusion.....	81
Chapitre III Modélisation et contrôle du système hybride étudié. ....	83
III.1. Introduction .....	84
III.2. Sources d'alimentation hybrides.....	85
III.2.1. Structure des convertisseurs de puissance .....	85
III.2.2. Modélisation du système hybride.....	87
III.3. Le contrôle par platitude .....	90

III.3.1.	Démonstration de la platitude du système hybride proposée.....	90
III.3.2.	Loi de commande.....	93
III.3.3.	Régulateur du courant.....	95
III.4.	Résultats de simulation .....	96
III.4.1.	Fonctionnement du système en mode normal.....	96
III.4.2.	Fonctionnement du système en mode économique .....	104
III.5.	Conclusion.....	111
	Conclusion générale .....	113
	Références.....	115

## Liste des figures

Figure I-1:	Le premier véhicule électrique de FRENCHMAN Gustave trouvé 1881. ....	5
Figure I-2:	GM avec l'EV1 et PSA avec la 106 Electric. ....	7
Figure I-3:	les différentes forces de traction du véhicule. ....	8
Figure I-4 :	Bilan des forces agissant sur le véhicule. ....	9
Figure I-5:	dégré d'électrification du véhicule[13]. ....	11
Figure I-6:	Les différentes architectures de transmission simplifiée véhicule électrique (a) : véhicule électrique a batterie, (b) véhicule électrique hybride, (c) véhicule électrique a autonomie étendue [13]. ....	15
Figure I-8:	Le fonctionnement dynamique du VEH .....	17
Figure I-9:	Véhicule électrique à pile à combustible.....	25
Figure I-10:	Expérience de sir W.Grove EN 1839 à gauche électrolyse, à droite : expérience inverse. ....	26
Figure I-11 :	Principe de la batterie à gaz (Grove, 1842). ....	26
Figure I-12:	schéma du fonctionnement d'une pile à combustible classique [13]. ....	28
Figure I-13:	Principe de base des piles à combustible acide (en haut) et alcaline (en bas). ....	29
Figure I-14:	Différents constituants d'une cellule.....	33
Figure I-15:	Structure et exemples de stack.....	33
Figure I-16:	Système de la pile à combustible. ....	34
Figure I-17:	Caractéristique statique de pile PEM. ....	37
Figure I-18:	Structure d'un super condensateur.....	41
Figure I-19:	Profil de décharge d'un super condensateur à courant constant - Modèle de base de supercondensateur .....	42
Figure I-20:	Modèle théorique d'un super condensateur.....	43
Figure I-21:	Modèle comportemental de type ligne de transmission. ....	44
Figure I-22:	Modèle énergétique à deux branches de R. Bonert et L. Zubieta. ....	44
Figure I-23:	Modèle énergétique distribué de F. BELHACHEMI.....	46
Figure I-24:	État en charge d'un super condensateur.....	46
Figure I-25:	État chargé maximal.....	47
Figure I-26 :	circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque.....	49
Figure I-27 :	Circuit équivalent d'un module photovoltaïque. ....	50

Figure-II-1 : Schéma de principe du hacheur parallèle. ....	55
Figure-II-2 : Réalisation Simulink du modèle mathématique de convertisseur BOOST. ....	57
Figure II-3 : Schéma de principe du hacheur BUCK/BOOST.....	58
Figure II-4: Réalisation Simulink du modèle mathématique de convertisseur BUCK-BOOST. .....	59
Figure II-5 : dimension de la toiture du véhicule RENAULT. ....	65
Figure II-6 : Dimensions du capot du véhicule. ....	66
Figure II-7 : super condensateur de 3000F. ....	70
Figure III-1: Schéma du système hybride FC-PV-SC proposé.....	85
Figure III-2: schéma de principe de l'alimentation d'un véhicule hybride FC, PV et SC proposé .....	86
Figure III-3: schéma de contrôle du système hybride FC-PV et SC proposé. ....	94
Figure III-4: Boucle de régulation de courant totale avec le régulateur PID .....	95
Figure III-5: Boucle de régulation du courant avec le régulateur PD.....	96
Figure III-6: La puissance produite par la pile à combustible et la source photovoltaïque. ....	97
Figure III-7: la puissance produite à partir du supercondensateur. ....	97
Figure III-8: Etat de charge du super condensateur.....	98
Figure III-9: le profil de la charge. ....	98
Figure III-10: Bilan des puissances du système. ....	99
Figure III-11: L'énergie de référence du bus continu.....	101
Figure III-12: La tension et la tension de référence du bus continu .....	101
Figure III-13: Le courant de la pile à combustible et son réfèrent. ....	102
Figure III-14: le courant de la source photovoltaïque et son réfèrent .....	102
Figure III-15: Le courant du super condensateur et son réfèrent .....	103
Figure III-16: La tension de la pile à combustible. ....	103
Figure III-17: La tension de la source photovoltaïque. ....	104
Figure III-18: La tension du super condensateur. ....	104
Figure III-19: La puissance produite par la pile à combustible et la source photovoltaïque en mode économique. ....	105
Figure III-20: La puissance produite à partir du super condensateur en mode économique. ....	105
Figure III-21: Etat de charge du super condensateur en mode économique. ....	106
Figure III-22: La tension et sa référence du bus continu en mode économique.....	106
Figure III-23: Energie du bus continu en mode économique.....	106
Figure III-24: Le courant de la pile à combustible et son réfèrent en mode économique. ....	107
Figure III-25: le courant de la source photovoltaïque et son réfèrent en mode économique. ....	107
Figure III-26: le courant du supercondensateur et son réfèrent en mode économique. ....	108
Figure III-27: La tension de la pile à combustible en mode économique.....	108
Figure III-28: La tension de la source photovoltaïque en mode économique.....	109
Figure III-29: Tension du supercondensateur en mode économique.....	109
Figure III-30: Réponse des puissances du système en mode économique. ....	110

## Liste des tableaux

Tableau I-1: Les avantages et les inconvénients de chaque architecture des EV.....	13
--	----

Tableau I-2: Les différents modes de fonctionnement du véhicule hybride avec les flux énergétiques correspondant à chaque mode.....	18
Tableau-II-1 : Tableau récapitulatif de la modélisation du hacheur BOOST. ....	56
Tableau II-2: Tableau qui résume les deux états de l'interrupteur S. ....	57
Tableau II-3 : Récapitulation du cahier de charge pour le dimensionnement du moteur .....	60
Tableau II-4: Récapitulation des calculs effectués pour le dimensionnement du moteur électrique .....	64
Tableau II-5 : caractéristique de la cellule solaire utilisé. ....	65
Tableau II-6 : Tableau des paramètres du SC. ....	70
Tableau II-7 : Cahier de charge du système convertisseur. ....	72
Tableau II-8 : Récapitulation des calculs effectués pour le dimensionnement des convertisseurs statiques. ....	80

## Nomenclature

Symbole	Désignation
EV	Electric vehicle (véhicule électrique).
AEV	All Electric Vehicle.
BEV	véhicule électrique à batterie.
VEH	Véhicule électrique hybride.
VHS	Véhicule hybride série.
VHP	Véhicule hybride parallèle.
FCEV	Fuel Cell Electric Vehicle.
PHEV	Plug-in Hybrid Electric Vehicle / Véhicule électrique hybride rechargeable.
ICE	Intern combustion engine /Moteur à combustion interne.
EREV / REEV	Extended Range Electric Vehicles.
SEV	Solar electric vehicle / véhicule électrique solaire.
ME	Machine électrique.
ZEV	Zero Emission Vehicle.
FC	Fuel Cell.
$F_{tot}$	La somme des forces de traction du véhicule.

$F_{aéro}$	La force aérodynamique.
$F_r$	La force de résistance au roulement.
$F_{roul}$	La force de résistance au roulement
$C_{RRmoy}$	Le couple de résistance au roulement, sur le goudron
$G$	Accélération de la pesanteur, $g = 9,81 \text{ m/s}^2$
$M$	La masse totale en charge
$\rho$	La densité de l'air
$V$	La vitesse relative par rapport à l'air
$C_x$	Coefficient de pénétration dans l'air
$S^f$	Section frontale de notre véhicule
$P \%$	La pente exprimée en pourcentage
$C_e$	Le couple moteur
$C_r$	Le couple nécessaire aux roues
$\Omega_e$	Vitesse angulaire
$F_h$	La force d'inclinaison.
$F_a$	La force de l'accélération du véhicule
$C_w$	Coefficient de frottement aérodynamique.
$V_{res}$	Vitesse relative du véhicule.
$V$	La vitesse du véhicule.
$V_w$	La vitesse du vent.
$C_r$	Coefficient de résistance des roues au roulement.
$A$	Angle d'inclinaison.
$\Lambda$	Facteur de masse qui dépend de la vitesse engagée.
$M$	La masse du véhicule (kg).
$P$	Densité de l'air ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ).

G	Accélération gravitationnelle ( $\text{m/s}^2$ ).
J	Moment d'inertie au niveau de la circonférence de la roue motrice.
I	Rapport de la boîte à vitesse.
R	Rayon de la roue.
PAC	Pile à combustible.
SSE	Source secondaire d'énergie.
ME	Machine électrique.
NASA	National Aeronautics and Space Administration
PEMFC	Proton Exchange Membrane Fuel Cell
$V_{FC}$	Tension de la pile à combustible (V)
$E_{Nernst}$	Potentiel d'équilibre thermodynamique
T	Température opératoire absolue de la pile (K)
$P_{H_2}$	Pression partielle à l'interface de l'hydrogène
$P_{O_2}$	Pression partielle à l'interface de l'oxygène
$V_{act}$	Pertes d'activation
$V_{con}$	Pertes de concentration
$V_{ohm}$	Pertes ohmiques
$I_{stack}$	Courant de fonctionnement de la pile (A)
$CO_2$	La concentration de l'oxygène ( $\text{mol/cm}^3$ ) dans l'interface du catalyseur de la cathode
$R_m$	La résistance équivalente de la membrane pour le flux d'ions
$R_c$	La résistance équivalente de contact à la conduction des électrons.
A	Surface active de la pile en ( $\text{cm}^2$ )
L	Epaisseur de la membrane (cm)
$\rho_M$	La résistivité spécifique de la membrane ( $\Omega \cdot \text{cm}$ )

$\Psi$	Fraction de l'aire ouverte d'une plaque perforée
J	La densité de courant du fonctionnement permanente (A/cm <sup>2</sup> )
J <sub>max</sub>	La densité de courant maximale (A/cm <sup>2</sup> )
B	Constante électrochimique qui dépend du type de pile et de son état de fonctionnement (V)
R	Constante universelle des gaz (8.314J/K.mol)
N	Nombre des cellules élémentaires de la pile
F	La constante de Faraday (96.487C/K.mol)
SC	Supercondensateur
C	Capacité de stockage
S	Surface de l'électrode.
D	Epaisseur diélectrique
C <sub>SC</sub> (t <sub>0</sub> )	Capacité initiale de super condensateur (Ah).
I <sub>SC</sub>	Courant du supercondensateur
I <sub>c</sub>	Le courant généré par la cellule
I <sub>ph,c</sub>	Le photo-courant d'une cellule
I <sub>0,c</sub>	Courant de saturation inverse de la diode d'une cellule
Q	Charge de l'électron (1.602 × 10 <sup>-19</sup> C)
K <sub>B</sub>	Constante de BOLTZMANN (1.38 × 10 <sup>-23</sup> J/K)
T	Température de la cellule (K)
V <sub>c</sub>	La tension aux bornes de la cellule

$R_{s,c}$	Résistance série de la cellule
$R_{sh,c}$	Résistance shunt de la cellule
$I_D$	Courant traversant la diode
$V_T$	Potentiel thermique
$V$	La tension aux bornes du module (V)
$V_{oc}$	Tension du circuit ouvert (V)
$I_{ph}$	Courant photoélectrique (A)
$I_0$	Courant de saturation inverse de la diode (A)
$I_s$	Courant de saturation de la diode (A)
$I_{CC}$	Courant de court-circuit (A)
$I$	Courant du module (A)
$N_s$	Le nombre des cellules en série.
$T_n$	Température nominale de fonctionnement (K)
$R_{sh}$	Résistance parallèle du module ( $\Omega$ )
$R_s$	Résistance série du module ( $\Omega$ )
$E_g$	Energie de gap (1.12eV)
$A$	Facteur d'idéalité de la diode
$K_i$	Constante de proportionnalité de courant ( $2,2 \times 10^{-3}$ )

$K_V$	Constante de proportionnalité de tension ( $73 \times 10^{-23}$ )
$G$	Irradiance ( $1000 \text{ W/m}^2$ )
$V_{\text{bus}}$	Tension du bus soit 120V
$U_{\text{stack-ch}}$	Tension du stack en pleine charge
$E_{\text{ch}}$	Tension de la cellule en pleine charge

# INTRODUCTION GÉNÉRALE

## **Introduction Générale**

L'électrification des moyens du transport urbain est une stratégie promettant d'aboutir à la réalisation d'un secteur de transport à faible émission de gaz carbonique et par suite le respect des engagements climatiques, malgré la décroissance mondiale d'émission de gaz à effet de serre sur les routes, les émissions en amont de la production d'électricité ne peuvent être ignorées, car nous sommes aujourd'hui à un moment décisif où nous traçons les grandes lignes du paysage électrique du demain. La généralisation du véhicule électrique est sur le point de devenir réalité.

De nos jours et pour le développement du véhicule électrique, la conservation de l'énergie, la protection de l'environnement et le développement adapté sont de plus en plus préoccupantes. Aujourd'hui les grands constructeurs automobiles présentent leurs derniers modèles sur les salons automobiles du monde entier car il s'agit de voitures zéro émission, économes, ménageant le climat, silencieuses, rapides et proposées à des prix abordables.

La technologie du véhicule électrique présente le bon assemblage des mathématiques et de la chimie car dans un véhicule classique, la puissance de propulsion est fournie uniquement par le moteur, alors que dans un véhicule électrique c'est les sources d'alimentation intégrées/le moteur qui fournissent toute la puissance de traction. Compte au véhicule électrique hybride, la force de traction est fournie par un mix de sources de puissance dont leur gestion énergétique doit être rigoureusement gérée par le véhicule lui-même. Ces nouveaux modes de mobilité et les infrastructures qui vont émerger autour nécessiteront des solutions de gestion de l'énergie fiable, sûre, pratique et fiable afin de permettre aux utilisateurs de recharger leurs véhicules selon leurs demandes ainsi notre étude s'intéressera tout particulièrement au type de véhicule électrique hybride, dont le choix des sources s'est dirigé vers des sources de dernières

génération tel que la pile à combustible qui sera la source primaire d'alimentation de véhicule électrique appeler aussi véhicule hydrogène, d'une source d'énergie renouvelable qui est la source photovoltaïque (source d'alimentation secondaire) et d'une source de stockage d'énergie promettant qui est le supercondensateur. Pour la commande et la gestion de l'énergie du système les problèmes qui ennuient à la performance de ce type de système sont toujours préoccupante. Parmi ces problèmes la commande et la gestion d'énergie. Or ces deux problèmes ont connu un développement assez intéressant, car de nos jours les systèmes sont de plus en plus stables ainsi leurs bonnes gestions d'énergie.

Pour la commande de notre véhicule nous allons s'intéresser à une nouvelle loi de commande dédiée aux systèmes embarqués à courant continu. L'algorithme de contrôle basé sur la notion de platitude différentielle est conçu pour gérer la stabilité du véhicule ainsi sa gestion d'énergie.

CHAPITRE I    PRINCIPES  
FONDAMENTAUX ET  
SOURCES D'ALIMENTATION  
DES VÉHICULES  
ÉLECTRIQUE.

## **I.1. Introduction**

L'enjeu principal de notre époque est de trouver des sources d'énergies renouvelables qui répondent aux besoins de la société. Néanmoins, l'énergie doit répondre à plusieurs critères comme l'abondance, la facilité et la rapidité d'utilisation, mais aussi le coût de production qui se doit d'être peu élevé. De plus, l'aspect « énergie propre et renouvelable » est aussi à prendre en compte sérieusement.

L'envie humaine a amélioré la qualité de vie et facilité les tâches quotidiennes à motiver l'introduction de milliers de nouvelles technologies et d'inventions. Ce désir nous a portés des moyens de transport marins, terrestre et aériens. Parmi eux, les automobiles qui dominent la majorité de nos voyages. [1]

Au cours des dernières années, des efforts remarquables ont été déployés par plusieurs états et entreprises afin de transformer le véhicule thermique en un véhicule électrique offrant une solution verte et fiable. La demande en VE augmente au fil des années et spécialement aux états unis, Europe et l'Asie et cela avec une perspective révolutionnée et un prix compétitif. Le VE reste un choix judicieux pour tout utilisateur donc un effort supplémentaire est nécessaire pour améliorer ce type de véhicule. Cette vitesse était de loin supérieure à celle possible avec les calèches. Le grand public s'est intéressé aux voitures ou voitures sans chevaux, comme on appelait ces véhicules.

L'objectif de ce premier chapitre est de présenter brièvement le véhicule électrique, aussi les différentes sources utilisées dans le véhicule électrique hybride, ce dernier est alimenté principalement par la pile à combustible (FC : Fuel Cell) et les panneaux photovoltaïques et pour le stockage de l'énergie électrique nous intéresserons au stockage d'énergie par le super condensateur (SC).

Pour chacune de ces sources nous expliquerons leurs caractéristiques physiques, aussi leurs modèles mathématiques.

## **I.2. Principes fondamentaux du véhicule électrique**

### **I.2.1. Historique et description générale du véhicule électrique**

Le premier véhicule électrique a été conçu par FRENCHMAN Gustave trouvé en 1881[2] , C'était un tricycle propulsé par un moteur à courant continu de 0,1 hp alimenté par des batteries au plomb. L'ensemble du véhicule et son conducteur pesaient environ 160 kg et en 1883, un véhicule similaire a été construit par deux professeurs britanniques. Ces premières réalisations n'ont pas attiré beaucoup d'attention du public parce que la technologie n'était pas suffisamment mûre pour rivaliser les calèches. Des vitesses de 15 km / h et une autonomie de 16 km n'étaient pas excitantes pour les clients potentiels. Or et en 1864 la course Paris-Rouen a tout changé, car une distance de 1135 km a été parcourus en 48 h et 53 min à une vitesse moyenne de 23,3 km / h [2].



Figure I-1: Le premier véhicule électrique de FRENCHMAN Gustave trouvé 1881.

Les 20 années suivantes ont été une époque où les véhicules électriques rivalisaient avec leurs homologues à essence. Cela était particulièrement vrai en

Amérique, où il n'y avait pas beaucoup de routes pavées en dehors de quelques villes. La gamme limitée de véhicules électriques n'était pas un problème. Cependant, en Europe, l'augmentation rapide du nombre de routes goudronnées a nécessité des portées étendues, favorisant ainsi les véhicules à essence. [3]

Le premier véhicule électrique commercialisé était l'électro boat de Morris et Salom. Ce véhicule était exploité comme taxi à New York par une société créée par ses propres inventeurs. Il pourrait être utilisé pour trois quarts de 4 h avec des périodes de recharge de 90 minutes entre les deux. Il était propulsé par deux moteurs de 1,5 hp qui permettaient une vitesse maximale de 32 km / h et une autonomie de 40 km [4]. L'avancée technique la plus importante de cette époque a été l'invention du freinage régénératif par Frenchman M.A. [3, 5]

Parmi les véhicules électriques les plus importants de cette époque, le premier véhicule qui atteint les 100 km / h. C'était « La Jamais Contente » [3][[6, 7] construit par la française Camille Jenatzy. Notez que Studebaker et Oldsmobile ont commencé leur activité en construisant des véhicules électriques ; et comme les véhicules à essence sont devenus plus puissants, plus flexibles et plus facile à manipuler les véhicules électriques commencent à disparaître. En plus de leurs cout élevées leurs problèmes majeurs été leurs autonomies et leur performance limitées. Les derniers véhicules commercialement importants ont été lancés vers 1905.

Et c'est seulement en 1960 et 1970 que les préoccupations environnementales ont relancé les recherches sur les véhicules électriques. Cependant et malgré les progrès de la technologie des batteries et de l'électronique de puissance, leurs performance retentent un obstacle [3].

L'ère des véhicules électriques modernes a culminé dans les années 1980 et au début des années 1990 avec la sortie de quelques véhicules réalistes par des sociétés telles que GM avec l'EV1[8] et PSA avec la 106 Electric. Bien que ces véhicules aient représenté une véritable réussite, en particulier par rapport aux premières réalisations, au début des années 1990 il est devenu clair que les automobiles électriques ne pourraient jamais rivaliser les automobiles à essence pour l'autonomie et les performances. La raison en été principalement les batteries, l'énergie est stockée dans le métal des électrodes, qui pèsent beaucoup plus que l'essence pour le même contenu énergétique.



Figure I-2: GM avec l'EV1 et PSA avec la 106 Electric.

L'industrie automobile a abandonné le véhicule électrique pour mener des recherches sur les véhicules électriques hybrides. Après quelques années de développement, ceux-ci sont beaucoup plus proches de la chaîne de montage pour la production que les véhicules électriques ne l'ont jamais été.

Le concept de véhicule électrique hybride est presque aussi ancien que l'automobile elle-même. Le but principal, cependant, n'était pas tant de réduire la consommation de carburant que d'aider l'ICE à fournir un niveau de performance acceptable. En effet, au début, l'ingénierie ICE était moins avancée que l'ingénierie des moteurs électriques [9].

En 1899 les premiers véhicules hybrides ont été présentés au Salon de Paris. Ils ont été construits par les établissements Pieper à Liège, en Belgique et par la Vendovelli et Priestly Electric Carriage Company. Le véhicule Pieper était un hybride parallèle avec un petit moteur à essence refroidi à l'aide de l'air, il été assisté par un moteur électrique et des batteries au plomb-acide. Il est rapporté que les batteries ont été chargées par le moteur lorsque le véhicule a roulé en roue libre ou était à l'arrêt [7].

Le monde d'automobile a connu une grande innovation au cours des années récentes, il est intéressant de mentionnée qu'avec le Camry Hybride de la gamme Toyota à remporter plusieurs prix , et parmi ces titres les titres de voiture canadienne de l'année et de meilleure voiture familiale de plus de 30 000 \$ CAN et l'association canadienne des automobilistes le prix Pyramide 2007 CAA pour des initiatives environnementales [10]. La Peugeot c'est basé sur la structure existante d'un véhicule à traction Diesel en ajoutant deux moteurs électriques sur les roues arrière.

Pour la plus grande autonomie c'est hybride Honda Clarity qui prévoyait sa sortie en 2018 et cela avec une autonomie de 76 Km. De plus, le constructeur vise à ce que les véhicules électriques représentent les deux tiers de ses ventes automobiles mondiales d'ici 2030.

### I.2.2. La puissance de traction

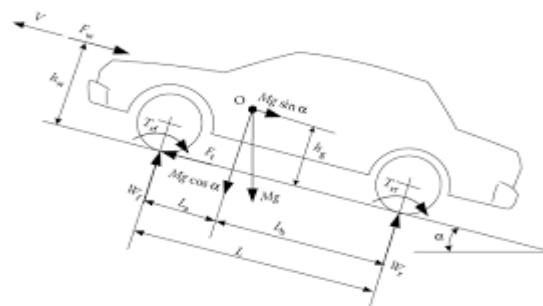


Figure I-3: les différentes forces de traction du véhicule.

Lors de la modélisation mécanique d'un véhicule, les deux caractéristiques principales sont : sa masse et le volume qui l'occupe dans l'espace. Cela nous permet d'identifier les forces exercées sur le véhicule tel que la force aérodynamique, la force d'inertie et la résistance au roulement.

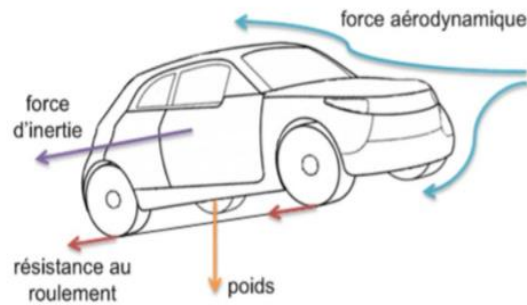


Figure I-4 : Bilan des forces agissant sur le véhicule.

Donc le système de propulsion doit fournir un effort de traction au niveau de la roue qui est égale à la somme des forces pour surmonter la trainée aérodynamique, la résistance au roulement et l'inclinaison de la route. Ce système doit aussi fournir l'effort nécessaire à l'accélération du véhicule au niveau des roues est définie à partir des équations suivantes :

$$F_{\text{tot}} = F_w + F_r + F_h + F_a \quad (\text{I.1})$$

$$F_{\text{aéro}}: \text{ La force aérodynamique} = \frac{1}{2} \rho A_f C_w V_{\text{res}}^2 .$$

$$F_r : \text{ La force de résistance au roulement} = m g C_r \cos \alpha .$$

$$F_h : \text{ L'inclinaison} = m g \sin \alpha .$$

$$F_a : \text{ La force de l'accélération du véhicule} = m \lambda \frac{dV_{\text{res}}}{dt} .$$

Et que  $A_f$  : surface frontale du véhicule ( $\text{m}^2$ ).

$C_w$  : Coefficient de frottement aérodynamique.

$V_{res}$  : vitesse relative du véhicule =  $V + V_w$ , ou  $V$  est la vitesse du véhicule et  $V_w$  la vitesse du vent.

$C_r$  : Coefficient de résistance des roues au roulement.

$\alpha$  : Angle d'inclinaison.

$\lambda$  : facteur de masse qui dépend de la vitesse engagée.

$m$  : la masse du véhicule (kg).

$\rho$  : Densité de l'air ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ).

$g$  : accélération gravitationnelle ( $\text{m}/\text{s}^2$ ). [11]

La force d'accélération du véhicule peut être aussi calculée par la formule suivante :

$$F_a = \left[ m + \sum J \left( \frac{i}{r} \right)^2 \right] \frac{dV_{res}}{dt} \quad (I.2)$$

Où  $J$  est le moment d'inertie au niveau de la circonférence de la roue motrice,  $i$  est le rapport de la boîte à vitesse et  $r$  est le rayon de la roue.

D'après la formule précédente de la force aérodynamique  $F_w$ , on remarque que cette dernière est d'une part proportionnelle à  $C_w$ . Ainsi, plus ce coefficient est réduit le profil du véhicule sera meilleur. D'autre part, elle est proportionnelle à la surface frontale du véhicule  $A_f$  de telle sorte que si cette dernière est de plus en plus réduite on arrive à la minimisation de la consommation d'énergie. [1, 11, 12]

### I.2.3. Configurations principales des VE

Le véhicule électrique en anglais Electric véhicule (EV) est basé sur un seul ou plusieurs moteurs (électrique ou traction) pour assurer la propulsion du véhicule. La classification des VE se fait selon le degré d'électrification et pour cela on utilise une échelle de 0 (0 signifie que le véhicule est conventionnel) à 1 (1 signifie que le véhicule est complètement électrique). [13]

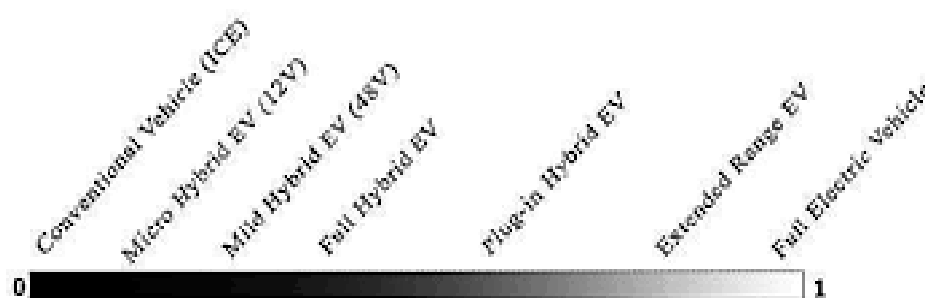


Figure I-5: degré d'électrification du véhicule[13].

Principalement il existe trois types de véhicule électrique :

- **BEV – AEV**

The All Electric Vehicle (AEV) « véhicule totalement électrique » or Battery Electric Vehicle (BEV) « véhicule électrique a batterie » utilise des batteries de haute capacité dont elle soutire son énergie, et la seul façon dont elle se recharge et par le branchement directe à un point de charge.[13]

- **HEV / PHEV**

Hybrid Electric Vehicle (HEV) qui signifie voiture électrique hybride, Ce type de véhicule se compose de trois principales architectures (série, parallèle et combiné). Le repère utilisé pour différencier les deux premières architectures est de définir le nœud

c'est-à-dire la nature de point de jonction entre les différentes chaînes de traction. Si le nœud est de nature électrique : architecture série et si le nœud est de nature mécanique : architecture parallèle [13] [1].

- **Architecture (VHS)**

Dans ce type d'architecture c'est le moteur électrique alimenté par les batteries et/ou le groupe électrogène qui assure la propulsion complète du véhicule ce qui nécessite un moteur électrique relativement puissant Le VHS est 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 [1, 13, 14]

- **Architecture (VHP)**

Ce type d'architecture résout le problème écologique du moteur thermique en ville mais aussi le problème d'autonomie du véhicule électrique pour les longues distances. Cette architecture utilise mécaniquement une combinaison de moteur électrique à basse vitesse dédiée au trafic en ville et un moteur à combustion interne (ICE) conventionnel à utiliser en dehors des zones urbaines, lorsque le mode (ICE) est actif le (ICE) s'arrête et la batterie commence à se charger à partir de l'alternateur entraîné par le même équipement du (ICE). Dans la configuration parallèle, les moteurs thermique et électrique sont tous les deux directement connectés à la transmission, donc aux roues. Les deux moteurs peuvent participer d'une façon parallèle au déplacement du véhicule, en transmettant chacun une puissance mécanique aux roues [1].

Le tableau suivant évoque les différentes architectures des véhicules électriques ainsi que les avantages et les inconvénients de chaque type [15]

Tableau I-1: Les avantages et les inconvénients de chaque architecture des EV

Architecture	Avantage :	Inconvénients :
Série	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ Bon rendement énergétique en mode tout électrique en zone urbaine</li> <li>◆ Gestion relativement facile</li> <li>◆ Très bon contrôle du moteur thermique</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ Faible rendement énergétique de la chaîne globale en zone extra-urbaine</li> <li>◆ Utilisation de trois machines dont une (au moins) de forte puissance</li> <li>◆ Mode tout thermique impossible</li> </ul>
Parallèle	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ Bon rendement énergétique</li> <li>◆ Modes tout électrique et tous thermiques possibles</li> <li>◆ Utilisation d'une seule machine électrique de puissance plus faible que pour l'architecture série</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ Gestion délicate</li> <li>◆ Fonctionnement du moteur thermique pas toujours optimal</li> <li>◆ Couplage mécanique et implantation des composants complexes</li> </ul>

Combinée	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ Bon rendement énergétique</li> <li>◆ Tous les modes sont possibles (thermique, électrique, série, parallèle ou série-parallèle)</li> <li>◆ Très bonne répartition de l'énergie</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ Gestion très délicate</li> <li>◆ Couplage mécanique et implantation des composants très complexes</li> <li>◆ Utilisation de trois machines</li> <li>◆ Coût élevé</li> </ul>
----------	--	--

Le niveau du véhicule qui suit le HEV est le (PHEV : Plug-in Hybrid Electric Vehicle) en français Véhicule électrique hybride rechargeable, en fait il comprend un nouveau système de charge de batterie qui peut être alimenté en externe. Le moteur à combustion fonctionne comme un système de sécurité : lorsque les batteries sont épuisées et le conducteur ne peut pas avoir une pause pour la charge. [13]

### **REEV**

La gamme des (EREV or REEV) Extended Range Electric Vehicles en français véhicule électrique à autonomie étendue, dont la propulsion du véhicule est entraînée uniquement par un moteur électrique alimenté par des batteries de grande capacité. Ces batteries sont maintenues chargées par une petite unité moteur-générateur. Sa petite consommation, moins de deux litres de carburant à 100 km, offre une autonomie étendue et une distance à atteindre[13].

La figure (I.6) illustre les différentes architectures de transmission du VE

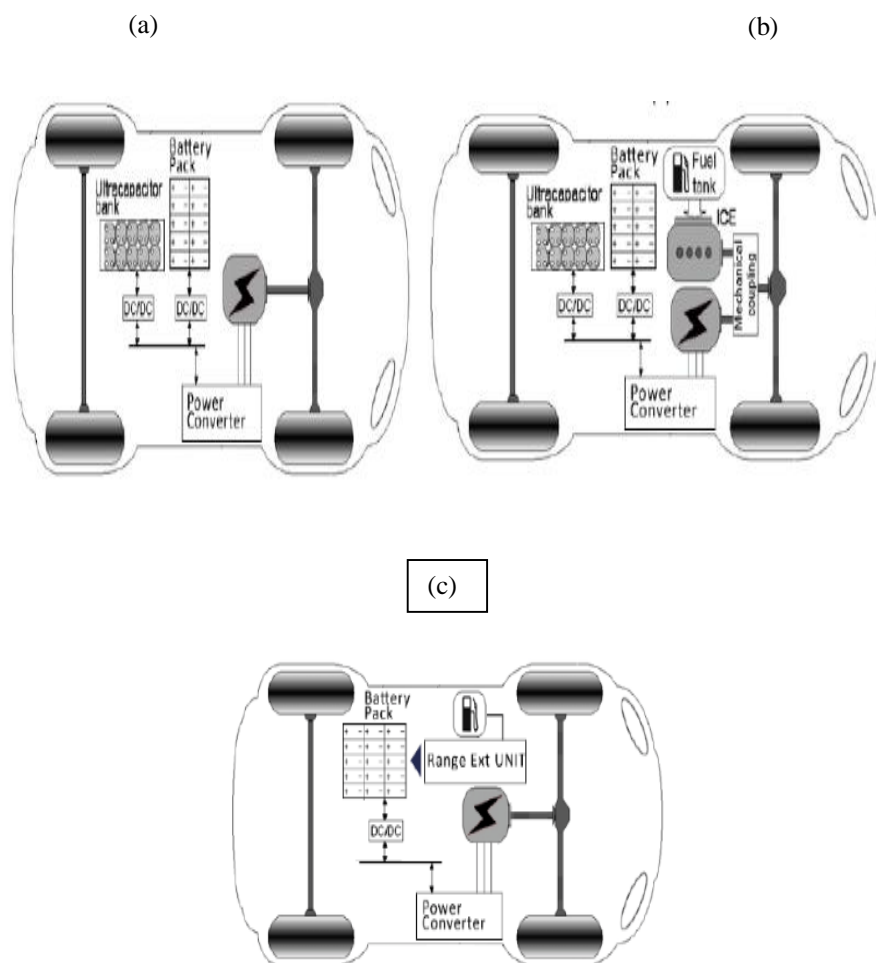


Figure I-6: Les différentes architectures de transmission simplifiée véhicule électrique (a) : véhicule électrique à batterie, (b) véhicule électrique hybride, (c) véhicule électrique à autonomie étendue [13].

- **SEV**

Le véhicule électrique solaire (SEV) est un véhicule électrique alimenté de manière importante ou complète par l'énergie solaire directe. A partir des panneaux solaires installer sur le dessus du véhicule. Généralement les cellules solaires convertissent directement le flux solaire en une énergie électrique. Étant donné que la seule source d'énergie convertit est l'énergie solaire, elle alimente tout ou partie de la propulsion, de l'électronique, de la communication, de la navigation, de la sécurité et d'autres fonctions auxiliaires du SEV. [13]

Le véhicule électrique est défini comme l'association de deux systèmes de stockage d'énergie embarqués distincts afin de se déplacer, dont l'un est de nature électrique. Aussi, ce type de véhicule utilise plusieurs sources d'énergie cela repose à la combinaison d'un ou plusieurs moteurs électriques avec un moteur thermique. L'arrêt des deux moteurs impose que le véhicule est immobile.

On note trois principaux modes de fonctionnement possible

✓ **Le mode thermique pur**

Le mode thermique pur consiste à la propulsion du véhicule qui est assuré complètement par le moteur thermique, autrement dit, lorsqu'une forte accélération est demandée le moteur thermique s'en charge. Il est donc nécessaire de rappeler que la pollution due à ce type de mode de fonctionnement est pareille à la pollution provoquée par un véhicule conventionnel. [1]

✓ **Le mode électrique pur**

La mise en marche du véhicule est assurée seulement par le moteur électrique. La vitesse maximale atteinte est entre 70 Km/h et 130 Km/h. Le véhicule alors est appelé ZEV (Zero Emission Vehicle). Donc les performances dynamiques et d'agrément de conduite sont similaires à celles d'un véhicule électrique. L'inconvénient majeur de ce mode de fonctionnement est la décharge des batteries. [1]

✓ **Le mode hybride**

Dans le cas où la puissance demandée par le véhicule est importante c'est-à-dire lors d'une forte accélération ou le passage d'une pente les deux moteurs électrique et thermique sont misés en marche simultanément, et cela pour additionner leurs couples moteurs.

Dans le cas de la traction du véhicule, l'énergie nécessaire à la propulsion est assurée soit par les deux moteurs soit par les moteurs électriques seulement. Or, le moteur électrique est utilisé pour recharger des batteries tout en roulant.

En phase de décélération ou de descente les batteries se rechargent, car le freinage régénératif permet au moteur/générateur de convertir une part d'énergie cinétique en énergie électrique. Le 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 [1].

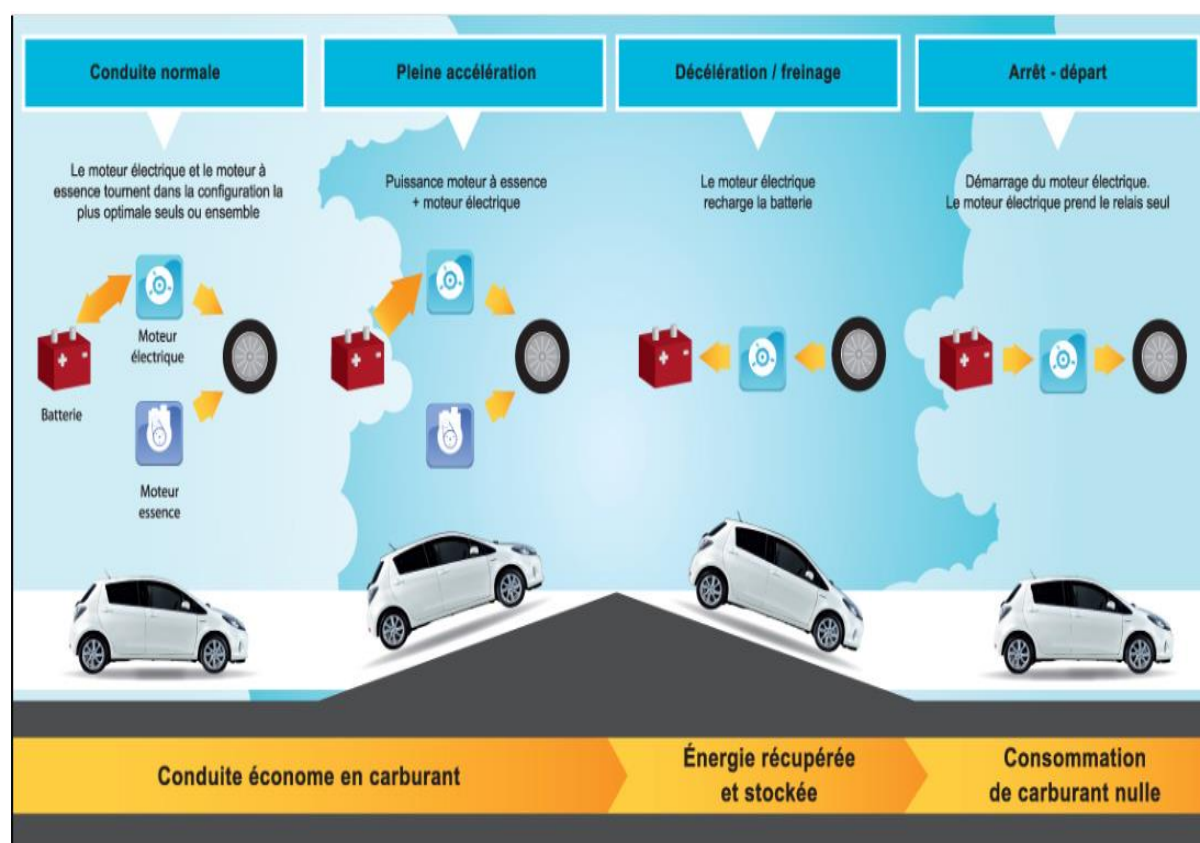


Figure I-7: Le fonctionnement dynamique du VEH

#### **I.2.4. Véhicule hybride**

Par définition, un véhicule hybride est un véhicule intégrant deux sources d'énergies différentes, par exemple un moteur thermique conventionnel avec son réservoir de carburant et une machine électrique associée à une batterie.[15, 16]

Dans le cas des véhicules à pile à combustible hybride, la motorisation reste électrique mais c'est la source de puissance qui est hybride, donc il utilise une source secondaire d'énergie électrique qui est réversible en puissance (fonctionnement en charge et décharge), le but d'ajouter une source secondaire d'énergie est de :

- Assister en puissance la pile à combustible : lorsque la pile atteint sa puissance maximale (par exemple en cas d'accélération du véhicule), la source secondaire fournit le complément de puissance.
- Récupération de l'énergie cinétique lors du freinage qui se manifeste en l'économisassions de l'hydrogène et l'augmentation de l'autonomie du véhicule.
- L'introduction d'un degré de liberté dans la répartition des puissances, c'est-à-dire que L'hybridation permet de répartir la demande de puissance entre les systèmes 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. [17]

Il existe plusieurs modes d'opérations du véhicule électrique, ces derniers peuvent être identifiés [4].

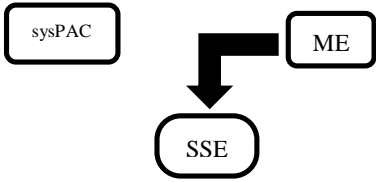
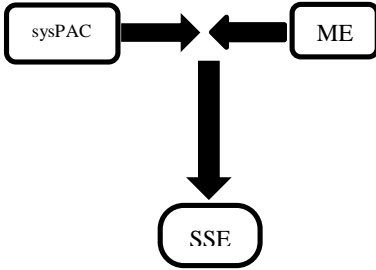
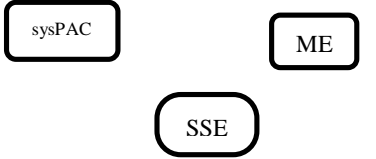
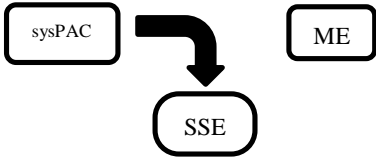
Les flux énergétiques différents résumés dans le tableau suivant [17]:

Tableau I-2: Les différents modes de fonctionnement du véhicule hybride avec les flux énergétiques correspondant à chaque mode.

Mode	Puissance	Schéma des flux énergétique	description
<b>Traction</b>	$P_{ME} > 0$ $P_{sysPAC} > 0$ $P_{SSE} = 0$		Le système PAC alimente seul la machine électrique.
	$P_{ME} > 0$ $P_{sysPAC} > 0$ $P_{SSE} > 0$		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.

Sys PAC : système de la pile à combustible

SSE : source secondaire d'énergie.

<b>Freinage</b>	$P_{ME} < 0$ $P_{sysPAC} = 0$ $P_{SSE} < 0$		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 la puissance du système PAC.
<b>Arrêt</b>	$P_{ME} = 0$ $P_{sysPAC} = 0$ $P_{SSE} = 0$		Aucun flux énergétique.
	$P_{ME} = 0$ $P_{sysPAC} > 0$ $P_{SSE} < 0$		Le système PAC recharge la source secondaire

ME : Machine électrique.

Sys PAC : système à pile combustible

### I.2.5 Machines électriques dans un VE et leurs contrôleurs

Le principe de base de fonctionnement des machines électriques est l'interaction de deux champs magnétiques, le premier est engendré par la partie fixe du moteur (stator) et le deuxième par la partie mobile (rotor).

C'est dernière décennie La motorisation électrique des véhicules est devenue un axe de recherche à part entière, et afin de sélectionner des machines électriques pouvant répondre aux besoins spécifiques de la traction automobile plusieurs travaux ont été tracé.

Les moteurs électriques destinés au VE et VEH doivent répondre à de multiples exigences permis ces exigences :

- Densités de puissance et de couple élevées. À titre d'exemple, le moteur de la Toyota Prius a une densité de couple de 5.6 Nm/kg et une densité de puissance de 1.6 kW/kg [18].
- Large plage de vitesse incluant une zone à couple constant et une zone à puissance constante. À partir des VEs et VEHs analysés, cette plage doit s'étendre sur des vitesses supérieures à 6000 rpm et peut atteindre 14000 rpm [18].
- Réponse en couple rapide
- Faible cout.

Les machines électriques sont classées en différentes catégories, et pour celles utilisé dans le domaine automobile on cite :

- **Les machines à courant continu**

Ils sont utilisés dans le domaine d'automobile comme une source d'alimentation des organes auxiliaires du véhicule tel que (levé vitre, essuie-glace, ventilateur...etc.). Leurs inconvénients majeurs est l'usure des balais ainsi le collecteur qui demande un entretien périodique de plus ils fournissent des faibles puissances[19].

- **Les machines électriques asynchrone**

Ce type de machine représente 80% du marché mondial des machines électriques. Parmi les caractéristiques de ces machines, leur robustesse, simplicité de conception et n'exige pas beaucoup d'entretien. Ils peuvent fournir un large spectre de puissance de quelques watt (moteurs asynchrones monophasés) à plusieurs Mégawatt à titre d'exemple assurer la propulsion de sous-marins. Pour les véhicules électriques c'est le constructeur Tesla qui utilise ce type de moteur pour propulser son véhicule nommé (S)[1].

- **Les machines synchrones à aimants permanents**

Au début du XXI<sup>e</sup> siècle, ce type de moteur semble promettre un avenir promettant Grâce aux aimants permanents qui produisent une densité magnétique élevée, on peut construire des moteurs synchrones plus compacts et plus légers que des moteurs asynchrones de même puissance Grâce à leur rendement particulièrement élevé elles sont les plus utilisées dans le domaine d'attraction d'automobile [8].

Or l'augmentation des prix des terres rares qui présentent les matériaux de compositions des aimants a forcé les constructeurs à remplacer ce type de machine par d'autres types de machine plus efficaces.

- **Les machines synchrones à rotor bobiné**

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, et pour assurer le fonctionnement de Stop and Start (machine réversible) un onduleur s'est substitué au redresseur.

Il existe deux architectures du rotor qui la compose, le premier rotor a griffe et le deuxième rotor a pole saillant, mais c'est la première architecture qui est la plus utilisée pour la fabrication des alternateurs automobiles.

Ils utilisent des bobinages pour créer le champ rotorique. Ce dernier peut être modulé électroniquement, ce qui permet un pilotage facilité à haute vitesse Ils nécessitent un contact électrique avec le rotor. C'est la solution adoptée par **Renault** sur **ZOE**.

- **Les machines les machines à réluctance variable**

Ce type de machines présente plus d'inconvénients que d'avantages dans le domaine d'automobile car elle génère de fortes ondulations, aussi ils sont très compliqués à commander mais c'est assez important de dire qu'elles représentent un grand avantage vis-à-vis à son cout de production.

Selon les directives de notre encadreur, nous limiterons notre étude sur la machine synchrone à rotor bobiné.

- **Les contrôleurs**

De nos jours les avancés techniques des contrôleurs ne cessent de développer. Parmi ces contrôleurs il existe un contrôleur standard et fréquemment utilisé pour le contrôle des machines électriques qui est le contrôleur PID (Proportionnelle, Intégrateur, Dérivateur). Dans notre travail nous allons s'intéresse tout particulièrement au régulateur PID et PI afin de contrôler les courants de références de chaque source proposée.

Un régulateur PID présente une implémentation de retour d'information « le feedback ». Grâce à l'action d'intégrale il peut éliminer la compensation de l'état d'équilibre, et la fonction dérivé peut anticiper l'état future du système[20].

Le régulateur PI est un circuit électrique (circuit de contre réaction), il permet d'éliminer l'erreur statique. L'inconvénient majeur d'une avance de phase (PID) réside en la non-annulation de l'erreur statique. On sait par contre que le PI remédie parfaitement à cet inconvénient. De là l'idée de combiner l'effet bénéfique de l'action PI aux basses fréquences (annulation de l'erreur statique) et de l'action PD (avance de phase) aux hautes fréquences (amélioration de la réponse transitoire) et de faire avec un régulateur PID[21].

### **I.3. Sources d'alimentation des véhicules électriques**

#### **I.3.1. Véhicule à pile à combustible**

La Fuel Cell Electric Vehicle (FCEV) inventé en 1840 a été introduit pour effectuer de longues distances. Il utilise un système de pile à combustible pour alimenter son moteur électrique embarqué. Les piles à combustible à membrane d'échange de protons généralement appelées piles à combustible à membrane d'électrolyte polymère (PEM) utilisées dans les FCEV utilisent de l'hydrogène stocké à bord et de l'oxygène de l'air pour produire de l'électricité[22].

Le problème majeur avec les piles à combustible, c'est qu'elles nécessitent l'hydrogène. Ce dernier peut être stocké à bord, mais ce n'est pas facile. Une solution alternative consiste à fabriquer l'hydrogène à partir d'un carburant tel que le méthanol.

Cette architecture technologique s'active selon 4 scénarios, dont le principal est d'utiliser l'hydrogène des réservoirs pour faire avancer le véhicule, via la pile à combustible et ses dispositifs associés[23].

Si la batterie n'est pas à sa pleine capacité, et que l'utilisation de l'engin le permet, la PAC va permettre de la recharger en même temps. Lors d'un fort appel de puissance, à l'accélération, la pile à combustible et la batterie vont alimenter de concert la motorisation électrique. Enfin, comme dans la très grande majorité des véhicules électriques, l'énergie cinétique des phases de décélération et de freinage va être transformée en électricité pour régénérer le pack lithium[24].

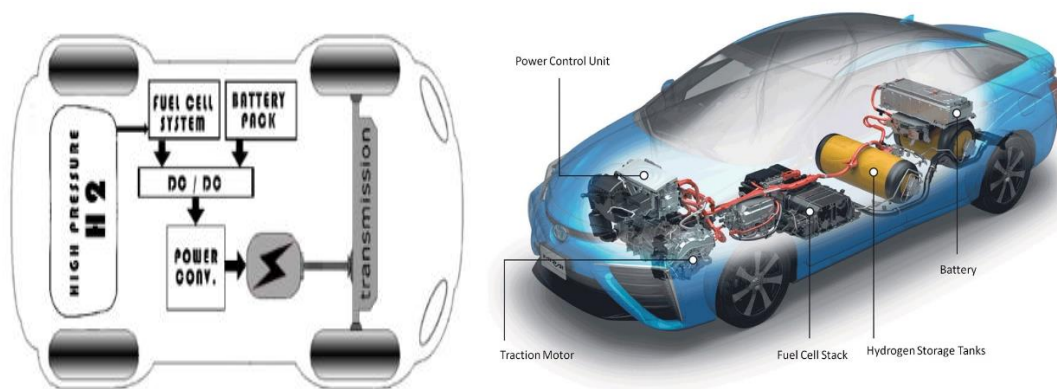


Figure I-8: Véhicule électrique à pile à combustible.

### I.3.1.1. Historique des piles à combustible

La production de l'électricité et de la chaleur s'avère possible dès l'année 1802, lors de l'énoncé du principe de l'électrolyse inverse de l'eau par le Sir Henry DAVID, et cela à partir de la réaction chimique entre l'oxygène et l'hydrogène. Or, la réalisation de la première pile à combustible (PAC) s'est effectuée en 1839 par le professeur de droit à l'Institut Royal de Londres Sir William Robert GROVE, et c'est à cette occasion qu'il est devenu connu par "le Père de la pile à combustible"[25]. La première mention d'un dispositif qui plus tard se nommera pile à combustible est basée

sur l'expérience de l'électrolyse de l'eau (séparation de l'oxygène et l'hydrogène de l'eau par l'utilisation de l'électricité) .Donc il a effectué la réaction inverse de l'électrolyse de l'eau pour produire de l'électricité car il a immergé dans l'acide sulfurique dilué deux bandes en platine contenant deux bouteilles séparé, l'une remplis d'hydrogènes et l'autre remplis d'oxygène et à cet effet un courant s'établit entre les deux électrode et de l'eau c'est formée dans les bouteilles de gaz [26]comme il est montré dans la figure (I.12).

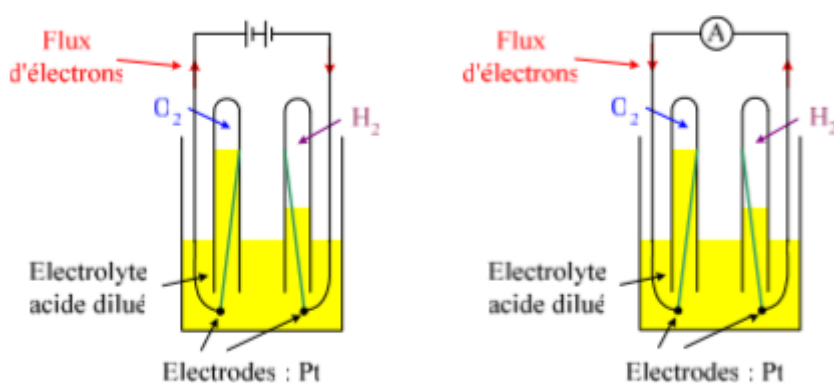


Figure I-9: Expérience de sir W.Grove EN 1839 à gauche électrolyse, à droite : expérience inverse.

Par suite le sir William Grove à continuer à améliorer son dispositif jusqu'à ce qu'il produise la batterie à gaz, et cela en faisant augmenter la tension produite précédemment par la mise en série de plusieurs dispositifs, ce qui a fait de lui un inventeur et précurseur de la pile à combustible[25].

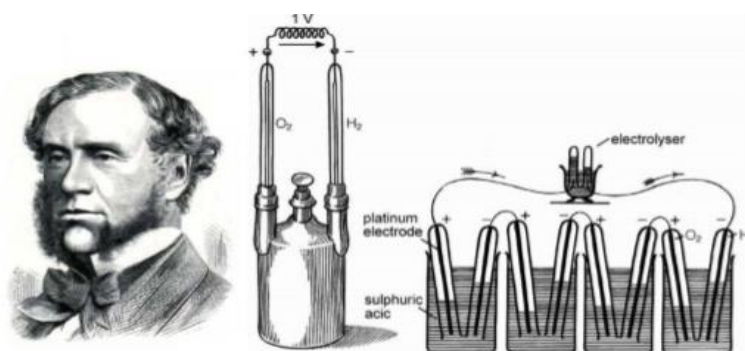


Figure I-10 : Principe de la batterie à gaz (Grove, 1842).

Après quelques années de l'apparition du grand organisme gouvernemental américaine NASA « National Aeronautics and Space Administration" vers les années soixante, la pile à combustible se manifeste pour eux comme une solution pour plusieurs problèmes de la production de l'électricité pour les vols spéciaux, problème du poids des batteries, de la cherté des panneaux solaires et les risques de l'énergie nucléaire. Ce qui a conduit la NASA a attribué un certain nombre de contrats de recherche pour développer cette solution. Ces recherches on portait leurs fruits par la création de la première membrane échangeuse de protons ou "membrane d'électrolyte polymère"[25].

C'est la NASA et la crise de l'énergie de 1973 qui ont encouragés les chercheurs à développer de plus en plus les piles à combustible, et depuis les recherches dans ce domaines n'ont cessé jusqu'à nos jours.[25]

### **I.3.1.2. Principe de base de la pile à combustible**

La pile à combustible est un dispositif électrochimique qui permet de transformer directement l'énergie chimique en une énergie électrique, c'est-à-dire sans le passage par un autre processus ni thermique ni dynamique. Le principe de fonctionnement de la pile à combustible est basé sur une réaction chimique appeler réaction d'oxydoréduction qui fait réagir l'hydrogène et l'oxygène pour avoir de l'électricité, de l'eau et de la chaleur [27, 28]. Le schéma du fonctionnement d'une pile à combustible classique est représenté dans la figure (I.14)

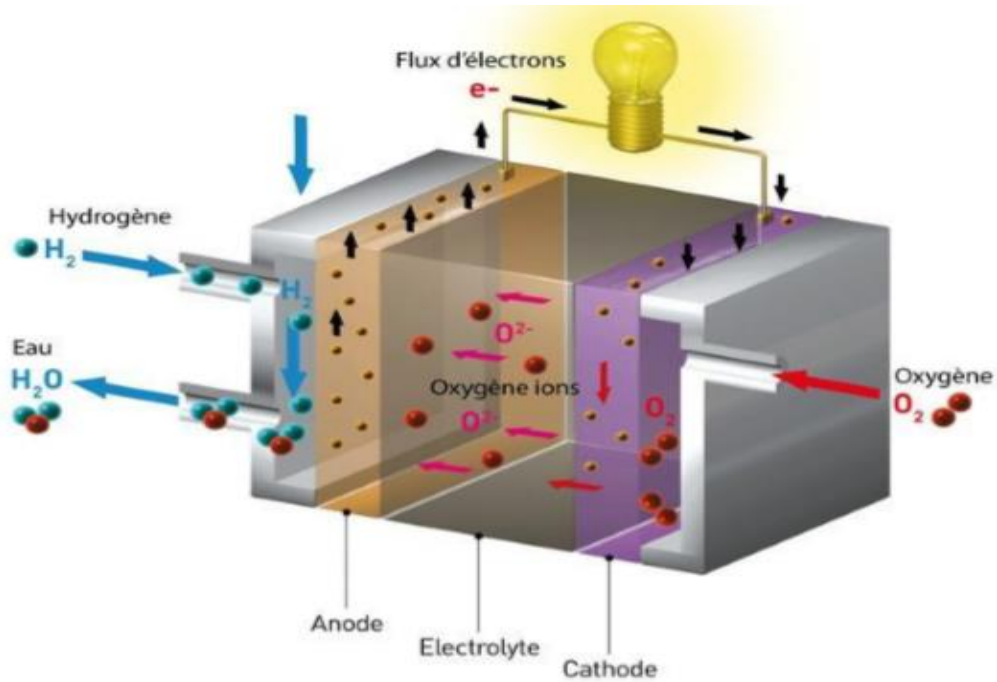
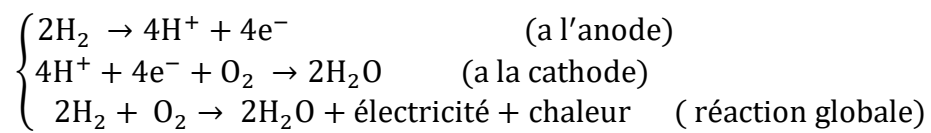


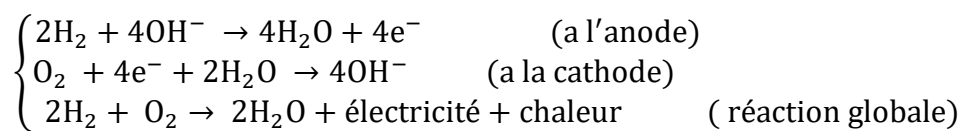
Figure I-11: schéma du fonctionnement d'une pile à combustible classique [13].

Selon le type de l'électrolyte soit acide ou alcalin on passe par deux équations de principes (figure 1.14)

- Pour un électrolyte acide on a :



- Et pour un électrolyte alcalin



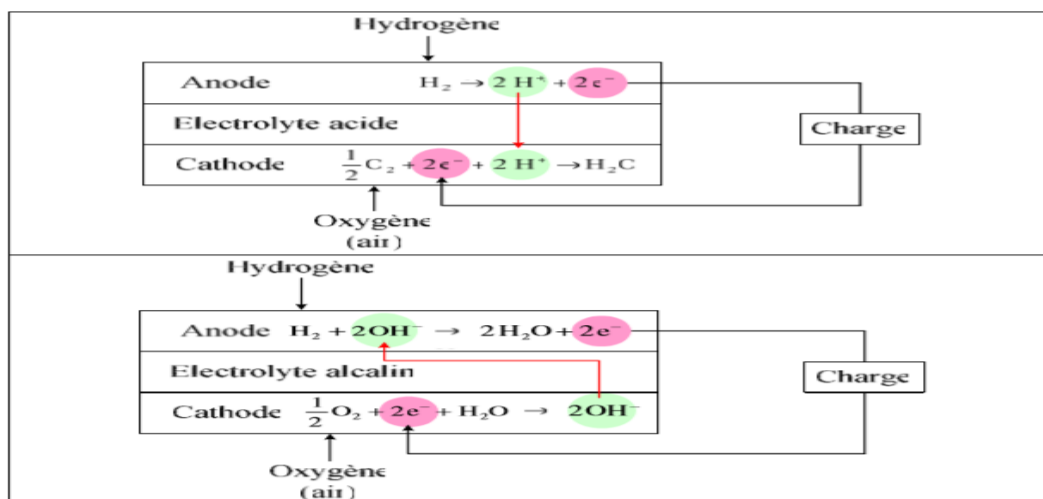


Figure I-12: Principe de base des piles à combustible acide (en haut) et alcaline (en bas).

En réalité, la structure de la pile à combustible est plus complexe que le schéma de principe représenté dans la figure précédente. [25, 29]

Les différentes piles à combustible sont définies selon la nature :

- De l'électrolyte (solide, acide, base ...)
- Du combustible
- De l'oxydation directe/indirecte
- De la température de fonctionnement.

Il existe de nombreuses technologies de PAC pour l'utilisation stationnaire.

- **Pile à membrane polymère (PEMFC)**

Généralement appelée (PEMFC) en anglais Proton Exchange Membrane Fuel Cell, elle appartient à la filière des piles à combustible couramment développée dite « acide à polymère solide », ce type de pile intéresse presque tous les acteurs de programme automobile à travers le monde. Elle intéresse également les industries pour les applications stationnaires (centaines de KW), portable (jusqu'à 100W), et transportable

de l'ordre de 100KW)[22]. La PEMFC paraît fiable et performante pour plusieurs systèmes électriques grâce à ces trois grandes caractéristiques [22]

- Sa basse température de fonctionnement permet un démarrage rapide, une grande souplesse de fonctionnement et une meilleure gestion thermique (moins de chaleur dégagée).
- Contrairement à la pile alcaline elle n'est pas sensible au gaz CO<sub>2</sub> présent dans l'air.
- Durée de vie sensiblement supérieure aux filières à électrolyte liquide à cause de sa technologie solide de l'électrolyte polymère, ainsi qu'à une industrialisation plus simple.

Or elle présente des inconvénients majeurs [30] :

- La cherté du catalyseur (Platine). Notamment pour les plaques bipolaires et la membrane.
- Sa sensibilité au monoxyde de carbone CO.
- Sa faible température de fonctionnement ne met pas en valeur la chaleur.

La cellule élémentaire de la PEMFC est constituée de plaques bipolaires en graphite, qui sont pressées contre l'assemblage membrane-électrode, ce dernier représente le cœur électrochimique du système.

Suivant l'équation  $H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$ , l'hydrogène est dissocié en présence catalytique au niveau de l'anode.

Ensuite les protons migrent vers la cathode en passant par l'électrolyte, la différence en électrons créent un pôle négatif et un pôle positif entre les quelles se déplacent les électrons, cette différence de potentiel génère de l'électricité pour alimenter une charge

(par exemple un moteur électrique). Simultanément l'eau est produite suite à la réaction des protons avec les électrons et cela à partir de l'oxygène au niveau de la cathode suivant la réaction de réduction  $4\text{H}^+ + 4\text{e}^- + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$ . A partir de ces deux réactions précédente on aboutit à la réaction globale  $2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O} + \text{électricité} + \text{chaleur}$ .

- **Les composants de la pile à combustible (PEMC)**

La pile regroupe une succession de couches (ou cellules élémentaires) pour permettre le fonctionnement de la pile. Il y a deux grandes parties : le cœur de la pile et les systèmes auxiliaires. Le grand avantage de la PAC c'est qu'il n'y a aucune partie mobile donc, aucune nuisance sonore et cela permet une usure limitée.

Nous avons choisi de présenter la pile à membrane polymère (PEMFC) qui est actuellement l'une des PAC les plus commercialisées et sur laquelle s'axent les principaux projets de développement à travers le monde.

- **La cellule unitaire**

Chaque cellule d'une pile est constituée de plusieurs composants

- **La membrane**

L'électrolyte de la PEMFC est une membrane polymère ionique de type acide, généralement la membrane est construite en nafion (un polymère carboné perfluoré) contenant des groupements sulfonés. Elle est d'une épaisseur de quelques micromètres ou plus. Son rôle est d'assurer de manière sélective le passage de proton depuis l'anode vers la cathode[27].

- **Les électrodes**

Les électrodes sont les lieux des réactions électrochimiques : oxydation à l'anode et réduction à la cathode. Elles sont constituées d'un feutre ou d'un papier de carbone d'une épaisseur de 100 à 300  $\mu\text{m}$  dont la face en contact avec l'électrolyte est enduite d'une pâte contenant du carbone platiné. Les électrodes doivent avoir la plus grande surface d'échange possible avec le gaz [27].

- **Couche de diffusion**

La couche de diffusion de gaz est construite avec un matériau poreux, ce qui lui permet d'assurer plusieurs fonctions [27] :

- ✓ Diffuse les réactifs vers le catalyseur.
- ✓ Evacuer l'eau produite.
- ✓ Transférer les électrons de l'anode vers la cathode.

- **Les plaques bipolaires**

Les plaques bipolaires assurent la distribution et la séparation des gaz à l'anode et à la cathode et de sont aussi des collecteurs de courants. Les éléments EME (électrode-membranes) sont accolés et connectés les uns aux autres par l'intermédiaire de ces plaques. Généralement ces plaques sont réalisées à partir du graphite [27].

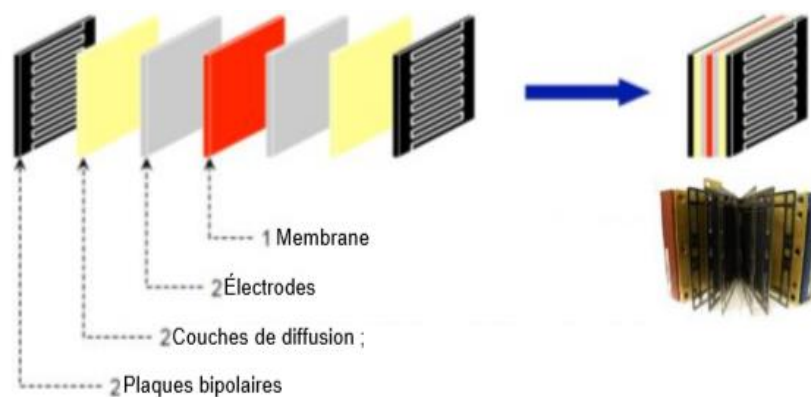


Figure I-13: Différents constituants d'une cellule

- **Stack (aussi appelé module en français)**

Une cellule unitaire fournit une tension maximale théorique limitée à environ 1.23V et sa capacité dépend de la surface cellulaire.

Pour obtenir une puissance suffisante, il est indispensable d'associer plusieurs cellules unitaires en série pour créer un assemblage appelé stack. En général, toutes les cellules sont empilées et connectées électriquement en série et fluidiquement en parallèle.

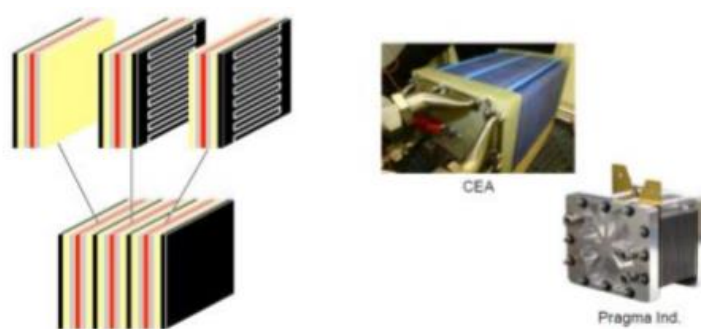


Figure I-14: Structure et exemples de stack.

Un stack de pile nécessite pour son fonctionnement l'ajout de plusieurs appareils auxiliaires destinés à l'alimentation et au conditionnement des gaz, à la gestion de l'humidification de la membrane et au contrôle de la température de fonctionnement du système. Généralement un système de pile à combustible est

constitué principalement d'un cœur de pile, de l'alimentation en hydrogène, de l'alimentation en air, d'un circuit de refroidissement, d'un circuit d'humidification, d'un convertisseur statique et en fin d'un système de contrôle comme il est représenté dans la figure suivante.

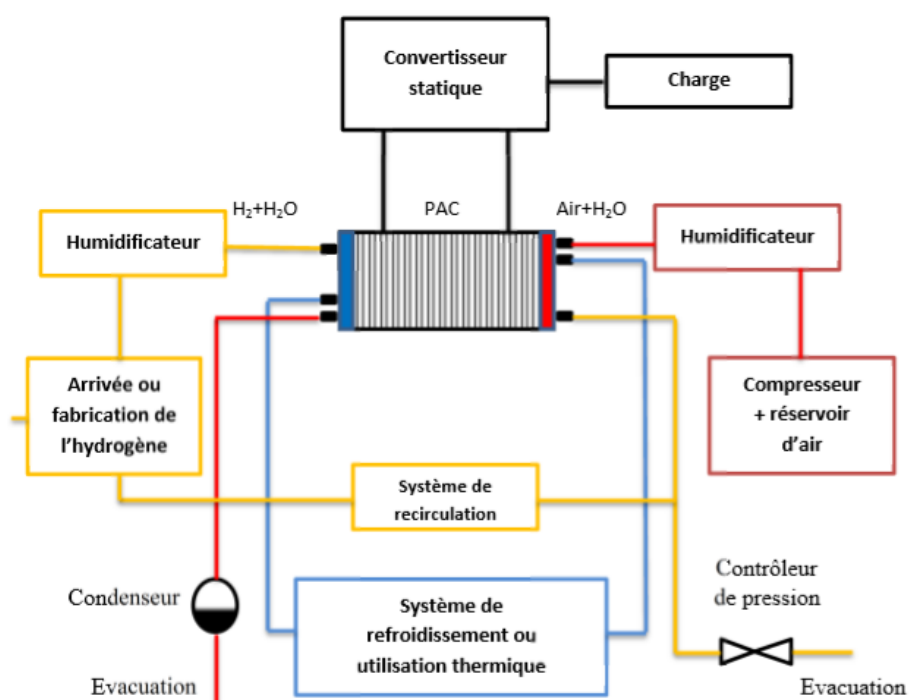


Figure I-15: Système de la pile à combustible.

### I.3.1.3. Avantages et inconvénients des piles à combustible [30]

#### ✓ Les avantages

La solution future dans les domaines de production d'énergie électrique et plus précisément dans le domaine d'automobile est la pile à combustible, cette vision est confirmée par leurs plusieurs avantages tel que :

- Elles présentent un haut rendement énergétique entre 40% et 70% qui dépendent essentiellement du type de la pile.
- Elles ont une faible émission de gaz à effet de serre.

- Nature de la construction modulaire Pour obtenir la puissance demandée les piles sont constituées de cellules élémentaires mises en parallèle ou en série. Donc on peut obtenir toutes les puissances possibles entre 1 kW jusqu'à plusieurs MW, en adaptant le nombre de cellules ainsi que la surface de chacune.
  - Elles peuvent fonctionner dans un large domaine de température un meilleur rendement électrique qui est plus adaptable aux applications mobiles ou portables. Mais aussi on peut utiliser la chaleur pour des applications domestiques ou industrielles pour les piles fonctionnant à haute température hautes températures.
- ✓ **Les inconvénients**

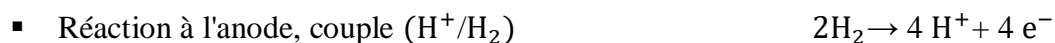
Mais aussi elles ont des inconvénients majeurs :

- Leurs couts élevés et principalement dans les applications automobiles, le prix des piles est 100 fois supérieur à celui assurant la compétitivité. Cela est dû à l'utilisation des matériaux rares
- Gestion thermique du module : Le module pile à combustible doit encore être intégré au reste du système. Dans le cas des applications automobiles, il faut évacuer la chaleur générée par la pile. Donc cela impose de la coupler à un système de refroidissement efficace. Pour les applications stationnaires, il s'agit de valoriser au maximum la chaleur sans pour autant devoir mettre de nombreux échangeurs de chaleur.
- Généralement le carburant utilisé est l'hydrogène donc il présente un risque majeur d'explosion et d'inflammabilité.
- Elles prennent beaucoup de volume mais aussi elles sont lourdes.

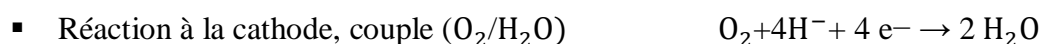
#### **I.3.1.4. Modélisation des piles à combustible**

Les technologies les plus adaptées pour les applications automobiles sont les piles à combustible PEMFC (Polymer Electrode Membrane Fuel Cell).

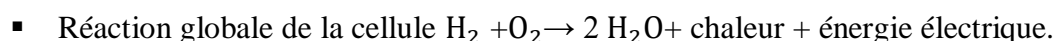
Pour ce type de piles à combustible avec un électrolyte conducteur de protons, une réaction d'oxydoréduction (en présence de platine) fait réagir l'hydrogène et l'oxygène pour produire de l'électricité, de l'eau et de la chaleur. A l'anode l'hydrogène est oxydé et les protons sont transportés à travers la membrane vers la cathode selon la réaction :[31]



L'oxygène est réduit à la cathode selon la réaction :



Les électrons circulent par le circuit externe durant ces réactions. Une fois arrivés à la cathode, les protons se recombinent avec les ions d'oxygène pour former de l'eau selon la réaction :



Dans ce chapitre nous allons présenter un modèle de pile à combustible basée sur l'évolution du potentiel d'équilibre thermodynamique de Nernst et les différents pertes (activation, ohmique, concentration).

##### **I.3.1.4.1. Modèle statique de pile à combustible**

De nombreux travaux proposent un modèle statique décrivant la courbe de polarisation de la pile PEM (figure I.17).[29, 32]

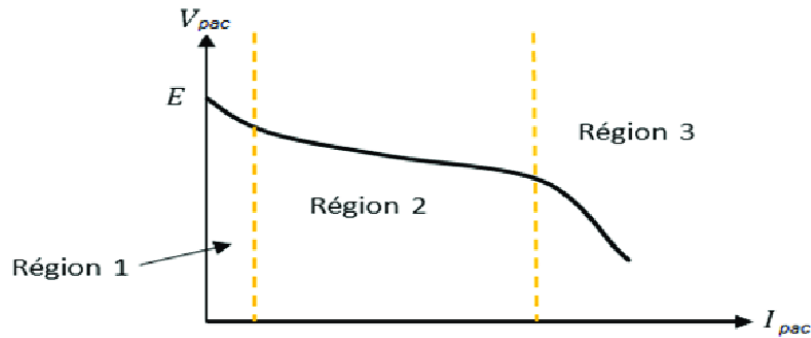


Figure I-16: Caractéristique statique de pile PEM.

$$V_{FC} = E_{Nernst} - V_{act} - V_{ohm} - V_{con} \quad (I.3)$$

Le potentiel réel ( $V_{FC}$ ) de la cellule décroît par rapport à la potentielle thermodynamique d'équilibre de la pile à combustible PEM quand le courant débite. Cette déviation à la valeur du potentiel de Nernst, est due aux pertes appelées souvent polarisation, proviennent principalement de trois sources : la polarisation d'activation  $V_{act}$  (ou chute d'activation de la région 1), la polarisation ohmique  $V_{ohm}$  (ou chute ohmique de la région 2) et de la polarisation de concentration  $V_{con}$  (ou chute de concentration de la région 3). Ces pertes entraînent, pour une pile de potentiel idéal  $E_{Nernst}$ , une chute de la tension :

$$V_{FC} = E_{Nernst} - \text{pertes. [33]}$$

### ➤ Tension de Nernst

$E_{Nernst}$  Dite tension réversible : est le potentiel d'équilibre thermodynamique.

L'expression de l'équation de Nernst simplifiée avec un calcul numérique en utilisant les valeurs standards de la température et de la pression se présente comme suit:[34]

$$E_{Nernst} = 1.229 - 0.85 \times 10^{-4} (T - 298.15) + 4.31 \times 10^{-5} \times T [\ln (PH_2) + \frac{1}{2} \ln (PO_2)]$$

Avec : T : Température opératoire absolue de la pile (K).

$PH_2, PO_2$  : Sont les pressions partielles à l'interface respectivement de l'hydrogène et de l'oxygène (atm).

### ➤ Polarisation 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 sert à briser et reformer les liaisons chimiques aux électrodes. A l'intervention de ces pertes 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 résulte que les pertes d'activation sont essentiellement dues aux réactions cathodiques. L'expression simple pour la surtension d'activation est donnée par la relation de Tafel :

$$V_{\text{act}} = - [\xi_1 + \xi_2 \times T + \xi_3 \times T \times \ln ([\text{CO}_2]) + \xi_4 \times \ln (I_{\text{stack}})]$$

Avec :  $I_{\text{stack}}$  : Courant de fonctionnement de la pile (A), et T : Température opératoire absolue de la pile (K).

$\xi_1, \xi_2, \xi_3, \xi_4$  : Représentent les coefficients paramétriques pour chaque modèle physique de pile à combustible PEM.[33]

$[\text{CO}_2]$  : La concentration de l'oxygène ( $\text{mol}/\text{cm}^3$ ) dans l'interface du catalyseur de la cathode, elle est exprimée en fonction de sa pression par la loi de Henry [34] :

$$[\text{CO}_2] = \frac{P_{\text{O}_2}}{5.08 \times 10^6 \times e^{\left(\frac{-498}{T}\right)}}$$

### ➤ Polarisation ohmique

La polarisation ohmique est un phénomène établi par une décroissance de la tension de la pile presque linéaire avec augmentation du courant. Les pertes ohmiques sont dues à la résistance que rencontrent les ions en traversant la membrane, et à la résistance que rencontrent les électrons dans les électrodes et le circuit électrique. Or, les ions ayant une mobilité bien plus faible que les électrons, la résistance de la membrane est bien plus grande. On peut exprimer les pertes ohmiques par l'utilisation de la loi d'Ohm :

$$V_{\text{ohm}} = I_{\text{stack}} \cdot (R_m + R_c)$$

Avec :  $I_{stack}$  : Courant de fonctionnement de la pile (A),  $R_c$  : La résistance équivalente de contact à la conduction des électrons,  $R_m$  : La résistance équivalente de la membrane pour le flux d'ions, elle est calculée à partir de la relation suivante :

$$R_m = \frac{\rho_M \times l}{A}$$

Où : A : Surface active de la pile en (cm<sup>2</sup>), l : Epaisseur de la membrane (cm),  $\rho_M$  : La résistivité spécifique de la membrane ( $\Omega \cdot cm$ ), obtenue par la relation suivante

$$\rho_M = \frac{181.6 \times \left[ 1 + 0.03 \left( \frac{I_{stack}}{A} \right) + 0.062 \left( \frac{T}{303} \right)^2 \left( \frac{I_{stack}}{A} \right)^{2.5} \right]}{\left[ \Psi - 0.634 - 3 \times \left( \frac{I_{stack}}{A} \right) \right] \exp \left[ 4.18 \left( \frac{T - 303}{T} \right) \right]}$$

Avec :  $\Psi$  : Fraction de l'aire ouverte d'une plaque perforée.[33]

### ➤ Polarisation de concentration

La polarisation de concentration est due aux gradients de concentration des réactifs [34], et puisque, la consommation des gaz diminue la pression partielle des gaz et cette réduction de pression dépend du courant délivré et des caractéristiques des circuits de gaz. Donc on observe une décroissance de tension proportionnelle à la densité de courant. Les pertes de concentration sont données par la relation suivante :

$$V_{con} = -B \times \ln \left( 1 - \frac{J}{J_{max}} \right)$$

Avec : J : La densité de courant du fonctionnement permanente (A/cm<sup>2</sup>)

$J_{max}$ : La densité de courant maximale (A/cm<sup>2</sup>)

B : Est la constante électrochimique. (V) qui dépend du type de pile et de son état de fonctionnement et donné par la relation suivante :[33]

$$B = \frac{R \times T}{n \times F}$$

Où : R : Constante universelle des gaz (8.314J/K.mol), T : La température (K), n : Nombre des cellules élémentaires de la pile, et F : La constante de Faraday (96.487C/K.mol)

### **I.3.2. Supercondensateurs**

Le niveau de maturité atteint par la technologie "super condensateur" permet aujourd'hui d'envisager sérieusement la conception de sources hybrides d'énergie électrique basées sur l'utilisation de ces composants comme source auxiliaire de puissance, en complémentarité avec une source principale d'énergie

Les supercondensateurs présentent une nouvelle technologie de stockage d'énergie spécifique supérieure à celle des condensateurs usuels, et de puissance spécifique supérieure à celle des accumulateurs électrochimiques.[35]

Ces composants étaient supposés venir en complément de batteries ou de piles à combustible dans les véhicules hybrides, dans les phases transitoires pour fournir les pics de puissance nécessaire sur une période courte durant les phases d'accélération, et de permettre la récupération durant les phases de freinage, afin de diminuer la taille et d'augmenter la durée de vie de la source principale d'énergie (batteries ou pile à combustible).

#### **I.3.2.1. Principes de base des super condensateurs**

Le principe général de fonctionnement des super condensateurs est basé sur le stockage de l'énergie sous forme électrostatique, c'est-à-dire par distribution des ions provenant de l'électrolyte au voisinage de la surface des deux électrodes. L'application d'une différence de potentiel aux bornes du dispositif complet entraîne le stockage électrostatique de charges aux deux interfaces électrode-électrolyte. C'est ce que l'on appelle la double couche électrique.

Les supercondensateurs ont une structure anode-cathode à base de charbon actif, permettant de disposer d'une surface active considérablement grande par rapport aux condensateurs classique, et donc d'obtenir des valeurs très élevées de capacités. De plus, le condensateur classique ne développe qu'une capacité (à l'anode) alors que les

deux électrodes du super condensateur portent des charges. Si on veut accroître la capacité de stockage, il faut augmenter la permittivité relative ou accroître le rapport ( $S/D$ ).

$$C = \epsilon_0 \times \epsilon_r \times S/D$$

Où :  $S$  : surface de l'électrode. et  $D$  l'épaisseur diélectrique.

L'énergie emmagasinée dans un super condensateur est liée à la valeur de la capacité  $C$  et de la tension imposée à ses bornes  $E = 0.5 \times C \times v^2$

Avec :  $V$  est la tension du super condensateur.

Un super condensateur se comporte donc comme deux capacités représentatives des charges stockées, connectées en série et séparées par une résistance correspondant à la résistance de l'électrolyte. La capacité totale vaut  $\frac{1}{c} = \frac{1}{c_1} + \frac{1}{c_2}$

La structure élémentaire d'un super condensateur est constituée par des collecteurs de courant en aluminium, des électrodes généralement en charbon actif imprégné dans un électrolyte organique ou aqueux. Un séparateur est inséré entre les deux électrodes pour les isoler comme indiqué sur la figure I.18.

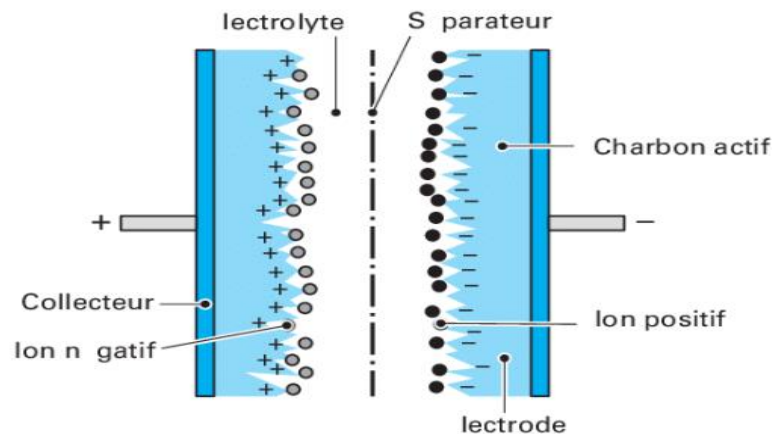


Figure I-17: Structure d'un super condensateur.

### I.3.2.2. Modèle électrique de super condensateur

La modélisation électrique des super condensateurs permet de déterminer leur comportement en vue d'une utilisation dans une application.

- **Modèle de base RC**

C'est le modèle de base le plus simple, il s'agit d'un circuit RC en série. Ou C représente la capacité principale du super condensateur et R la résistance série équivalente traduisant les pertes par effet joule dans le super condensateur.

Les paramètres de ce modèle sont facilement déterminés mais il ne tient compte ni de la variation de la capacité en fonction de la tension ni des autres paramètres comme la fréquence et la température. L'évolution de la tension de décharge de la cellule suite à un courant constant a une représentation linéaire. Ainsi, le comportement du super condensateur est assimilé à celui d'un condensateur classique (capacité constante en fonction de la tension).[35]

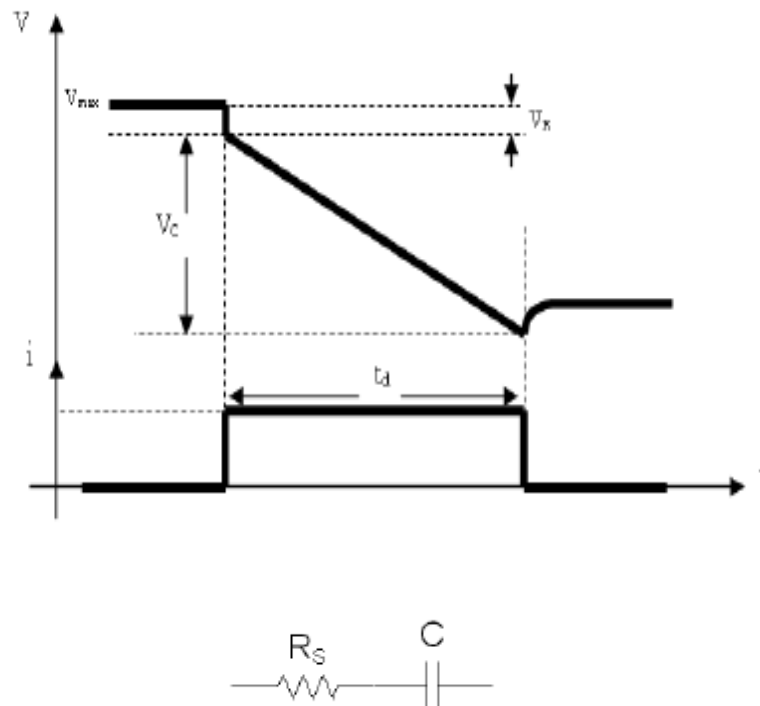


Figure I-18: Profil de décharge d'un super condensateur à courant constant - Modèle de base de supercondensateur

- **Modèle théorique**

La nature poreuse des électrodes du super condensateur fait apparaître une interface électrode-électrolyte distribuée dans l'espace. De sorte que le stockage de charges associé à la couche double électrique est modélisé, non pas par une unique capacité non-linéaire éventuellement résistive, mais par un réseau complexe de capacités non-linéaires, interconnectées entre elles par des résistances d'accès aux ports, comme schématisé sur la figure 1.32. Les différentes résistances représentées dans cette figure dépendent de la résistivité des matériaux d'électrode, de la résistivité de l'électrolyte, de la taille des pores et de la technologie d'assemblage (imprégnation des électrodes, qualité des contacts collecteur-électrode).[25, 36]

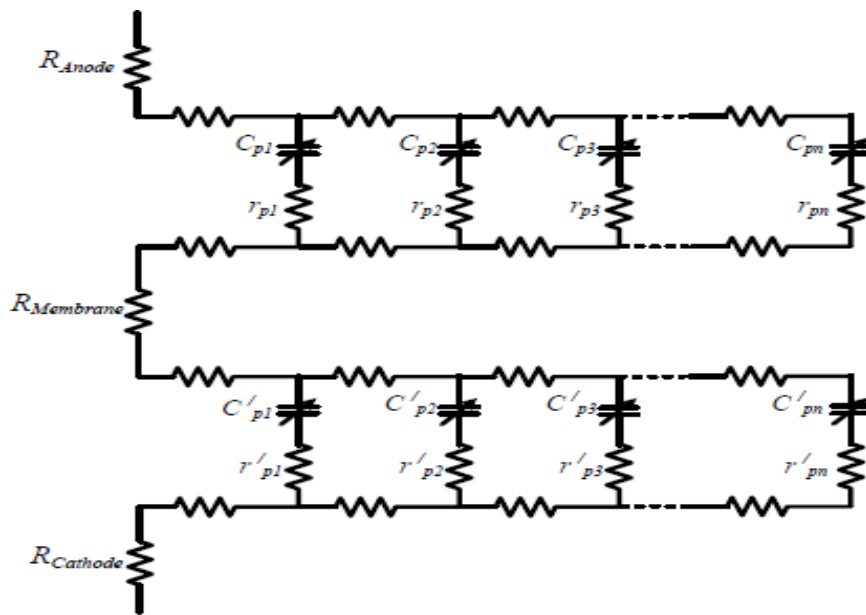


Figure I-19: Modèle théorique d'un super condensateur

A partir de ce modèle on peut déduire un modèle de comportement électrique de type ligne de transmission, représenté par plusieurs circuit RC en série (figure I.22) observable par étapes successives.

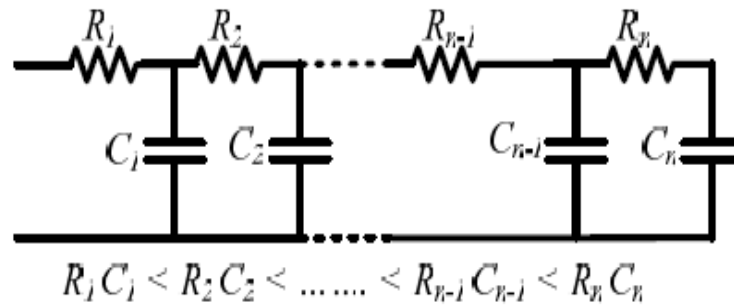


Figure I-20: Modèle comportemental de type ligne de transmission.

- **Modèle énergétique à deux branches**

Le premier véritable modèle de supercondensateur de puissance a été exposé par R. Bonert et L. Zubieta, deux auteurs se basent sur des considérations énergétiques pour établir leur modèle comportemental[29, 35]. Ce modèle prend en considération le non linéarité de la capacité du super condensateur, et dit à deux branches, basé sur la partition de l'énergie électrostatique des super condensateurs en deux : Une énergie rapidement stockée, et une énergie lentement stockée.

Ce modèle est constitué par conséquent de deux circuits  $R_i C_i$ , chacun avec une constante de temps différente (Figure I.22). La première branche ( $C_1, R_1$ ) dite rapide, rend compte de l'évolution de l'énergie durant les phases de charge ou de décharge. La deuxième branche ( $C_2, R_2$ ) dite lente, modélise la phase de redistribution interne de l'énergie à la fin de chaque charge ou décharge du supercondensateur (durant les phases de repos).

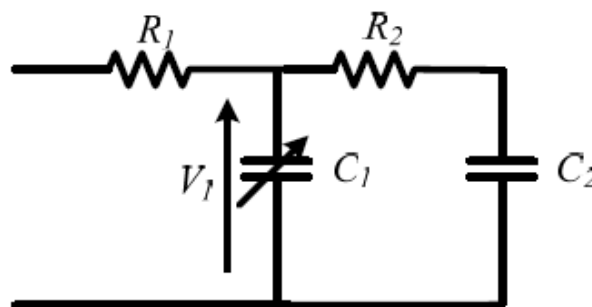


Figure I-21: Modèle énergétique à deux branches de R. Bonert et L. Zubieta.

Cependant, la loi de non linéarité de la capacité principale, loi linéairement croissante, n'est physiquement pas conforme à ce que peut donner la théorie de la couche double, qui prévoit une variation de la capacité beaucoup plus forte aux faibles potentiels qu'aux potentiels plus élevés. En outre, Les études de F. BELHACHEMI ont montré que le modèle à deux branches menait à une surévaluation de la capacité principale, en particulier dans les temps courts. Le problème réside dans ce que la capacité du super condensateur est fortement dépendante d'autres paramètres et notamment des phases transitoires comme le phénomène de redistribution des charges internes.

- **Modèle énergétique distribué**

L'auteur F. BELHACHEMI améliora la précision du modèle à deux branches, et propose un modèle qui représente le comportement du super condensateur pour les différentes gammes de fréquences d'utilisation. En effet, la cellule RC de la branche principale du modèle à deux branches a été remplacée par une ligne de transmission non-linéaire (discrétisée en un nombre fini de cellules identiques, de façon à permettre l'implantation du modèle dans les logiciels usuels de simulation électrique), pour une meilleure description du comportement électrique et énergétique des super condensateurs dans les temps courts. Quelques cellules RC non-linéaires ont été ajoutées pour appréhender plus finement les temps longs (Figure I.23). De plus, les lois décrivant la variation des différentes capacités du modèle en fonction de la tension sont choisies linéaires par morceaux, pour une meilleure approche de la physique associée aux propriétés capacitives de la couche double électrique. [35]

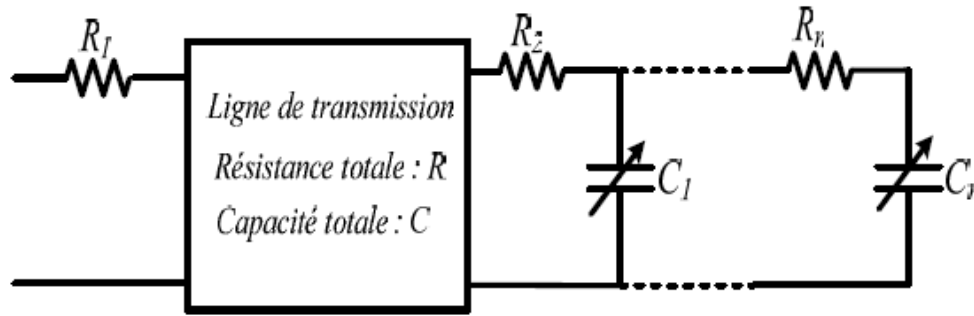


Figure I-22: Modèle énergétique distribué de F. BELHACHEMI.

### I.3.2.3. État de charge du super condensateur

La durée de vie des super condensateurs étant étroitement liée à la tension tenue, une surveillance individuelle et stricte de l'état de charge des composants associés en série doit impérativement être mise en œuvre, de façon généralement à équilibrer l'organe de stockage en tension. Pour définir l'état de charge à chaque instant d'un super condensateur, il est nécessaire de définir le terme de capacité, noté ici  $C_{SC}(t)$ , qui peut s'écrire de la manière suivante :  $C_{SC}(t) = C_{SC}(t_0) + \int_{t_0}^t I_{SC} dt$  [37]

Avec :  $C_{SC}(t_0)$  : La capacité initiale de super condensateur (Ah).

L'état de charge du super condensateur peut être décomposé en fonction de deux états différents du composant :[38]

#### a) En charge

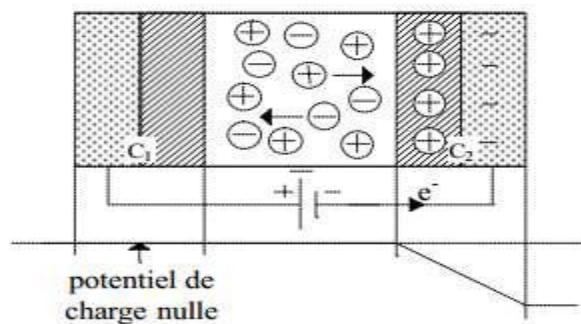


Figure I-23: État en charge d'un super condensateur.

Lors de l'application d'une différence de potentiel aux bornes du super condensateur, la distribution des charges aux deux interfaces va être modifiée. L'une

d'entre elles passant par son potentiel de charge nulle tandis que l'autre voit augmenter l'accumulation de charges. Il y a donc une augmentation du potentiel.

### b) État chargé

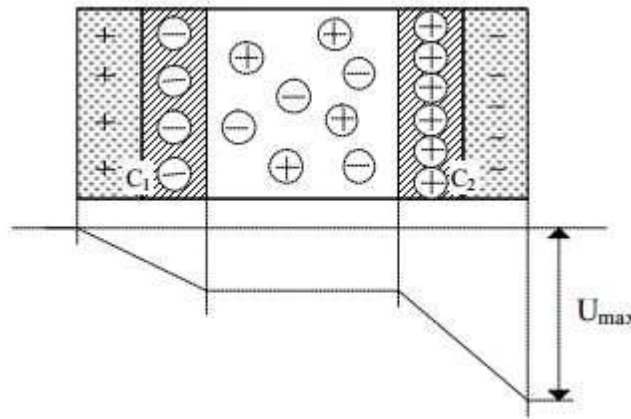


Figure I-24: État chargé maximal.

Si la charge est poursuivie jusqu'à la valeur maximale  $U_{\max}$  du potentiel applicable, les deux doubles couches électrochimiques se comportent comme deux capacités représentatives des charges stockées, connectées en série et séparées par une résistance correspondant à la résistance de l'électrolyte. Les deux condensateurs voient donc leurs charges augmentées selon une loi du type  $Q = C.U$

A l'état chargé, la capacité totale du dispositif résulte des capacités ( $C_1$  et  $C_2$ ) des deux interfaces en série est donc donnée par  $\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$

### I.3.3. Véhicule en utilisant une source photovoltaïque

Un système photovoltaïque est une source d'énergie renouvelable permet de transformer une partie du rayonnement solaire en électricité en utilisant des cellules photovoltaïques. Dans le cadre de cette étude, on utilise les cellules photovoltaïques comme une source secondaire (La pile à combustible représente la source primaire) d'énergie pour alimenter notre véhicule électrique.

### **I.3.3.1. Avantages et inconvénients de la source PV**

- **Avantage**
  - ✓ L'énergie solaire est une énergie renouvelable et par conséquent elle est inépuisable.
  - ✓ Aucune pollution, les sources photovoltaïques peuvent convertir l'énergie solaire en énergie électrique sans aucune pollution et ne provoque pas du gaz à effet de serre.
  - ✓ Installations avec un coût d'installation et de maintenance réduit. Le coût d'une installation solaire par rapport à d'autres types d'installations conventionnelles est très faible. De même, la maintenance d'une installation solaire n'est pas très coûteuse.
  - ✓ Faible entretien, les sources photovoltaïques n'ont pas besoin de beaucoup d'entretien.
  - ✓ Pas de risques électriques pour lors de l'utilisation.
  - ✓ Silencieuse, un système photovoltaïque ne provoque aucun bruit.
- **Inconvénients**
  - ✓ Dépendance de l'énergie solaire, les sources photovoltaïques ne fonctionnent pas quand l'énergie solaire n'est pas disponible.
  - ✓ Faible rendement des cellules photovoltaïque.
  - ✓ Densité énergétique et rendement, la densité énergétique des sources photovoltaïques est faible et le rendement réel de conversion est faible.
  - ✓ La taille et surfaces des installations photovoltaïques sont toujours importantes.
  - ✓ Cout élevé à cause du système de stockage imposé pour les jours à ciel couvert ou la nuit.

### I.3.3.2. Modélisation d'une source PV pour un VE

Plusieurs recherches sont développées pour la modélisation mathématique de la cellule photovoltaïque. Le modèle mathématique de la cellule photovoltaïque décrit la courbe de courant-tension de la jonction PN.

Afin d'analyser le comportement électrique d'une cellule solaire, un modèle électrique équivalent est considéré. Ce modèle est constitué d'une source de courant  $I_{ph}$  pour modéliser le flux lumineux, en parallèle avec une diode reprenant les phénomènes de polarisation de la jonction PN, et de deux résistances (une résistance shunt  $R_{sh}$  et une résistance en série  $R_s$ ) pour représenter les pertes électriques. Le circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque est représenté dans la figure 1.21 ci-dessous :

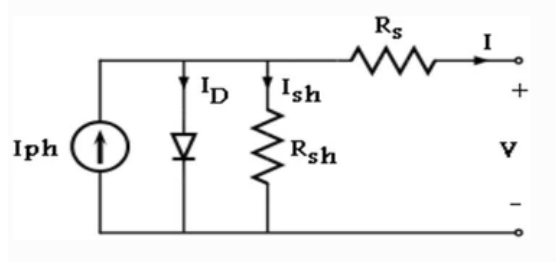


Figure I-25 : circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque.

En se basant sur le circuit, le courant généré par la cellule pourra être présenté par l'équation suivante[39, 40]:

$$I_c = I_{ph,c} - I_{0,c} \left[ e^{\left\{ \frac{(V_c + R_{s,c} I_c) q}{(n K_B T)} \right\}} - 1 \right] - \frac{V_c + R_{s,c} I_c}{R_{sh,c}}$$

Avec :  $I_{ph,c}$  : est le photo-courant d'une cellule,  $I_{0,c}$  : est le courant de saturation inverse de la diode d'une cellule,  $q$  : Charge de l'électron ( $1.602 \times 10^{-19}$  C),  $K_B$  : Constante de BOLTZMANN ( $1.38 \times 10^{-23}$  J/K),  $T$  : La température de la cellule (K),  $V_c$  : est la tension aux bornes de la cellule,  $I_c$  : est le courant généré par la cellule,  $R_{s,c}$  et  $R_{sh,c}$  : Sont les résistances série et shunt de la cellule.

Généralement, on trouve les cellules photovoltaïques connectées en série ou en parallèle afin d'obtenir des modules photovoltaïques. Les cellules connectées en série augmentent la tension, et les cellules connectées en parallèle augmentent le courant.

Un module est généralement composé de trente-six cellules en série et une seule branche en parallèle :  $n_s = 36$  cellules et  $n_p = 1$  cellule, sauf indication contraire de la part du constructeur.

A partir du circuit équivalent de la cellule PV on peut aboutir au circuit équivalent d'un module photovoltaïque représenté dans la figure 1.27 suivante :

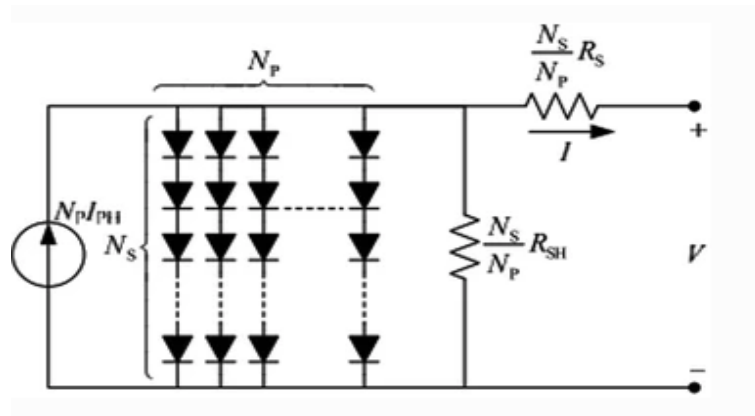


Figure I-26 : Circuit équivalent d'un module photovoltaïque.

Ce choix de modèle à Cinq paramètres, permet l'analyse et l'évaluation des performances du module photovoltaïque toute en se rapprochant de la réalité. Aussi, ce modèle nous a mené à l'obtention de Cinq équations qui nous aideras après à la simulation sur MATLAB.

Ces équations sont mentionnées ci-dessous : [41]

- Equation du courant photoélectrique :  $I_{ph} = [I_{CC} + K_i(T - 298.15)] \frac{G}{1000}$
- Courant de saturation inverse :  $I_0 = \frac{I_{CC} + K_i(T - 298.15)}{\left[ e^{(q V_{oc} + K_v(T - 298.15)) / (a K_B T N_s)} - 1 \right]}$

- Courant de saturation :  $I_s = \left[ I_0 \left( \frac{T}{T_n} \right)^3 e^{\left( \frac{q E_g}{a K_B} \left( \frac{1}{T_n} - \frac{1}{T} \right) \right)} \right]$

- Equation du courant parallèle :  $I_{Sh} = \frac{(V+I R_s)}{R_{Sh}}$

- Courant de sortie du module photovoltaïque :

$$I = I_{ph} - I_0 \left[ e^{\{(V+IR_s) q/(n K_B T N_s)\}} - 1 \right] - I_{sh} \text{ Avec :}$$

$$I_0 \left[ e^{\{(V+IR_s) q/(n K_B T)\}} - 1 \right] = I_D : \text{ Courant traversant la diode.}$$

$$\frac{K_B T N_s}{q} = V_T : \text{ Représente le potentiel thermique (25 mV à 25 °C).}$$

V : La tension aux bornes du module (V).

$V_{oc}$  : Tension du circuit ouvert (V).

$I_{ph}$  : Courant photoélectrique (A).

$I_0$  : Courant de saturation inverse de la diode (A).

$I_s$  : Courant de saturation de la diode (A).

$I_{CC}$  : Courant de court-circuit (A).

I : Courant du module (A).

$N_s$  : Le nombre des cellules en série.

T : La température ambiante (K).

$T_n$  : Température nominal de fonctionnement (K).

$R_{Sh}$  : Résistance parallèle du module ( $\Omega$ ).

$R_S$  : Résistance série du module ( $\Omega$ ).

$E_g$  : Energie de gap (1.12eV).

$a$  : Facteur d'idéalité de la diode (1 pour l'injection de porteurs minoritaires de bas niveau, 1,36 pour la cellule solaire et 2 pour les deux porteurs de haut niveau).

$K_i$  : Constante de proportionnalité de courant ( $2,2 \times 10^{-3}$ ).

$K_V$  : Constante de proportionnalité de tension ( $73 \times 10^{-23}$ ).

$G$  : Irradiance ( $1000 \text{ W/m}^2$ ).

#### **I.4. Conclusion**

Comme conclusion nous avons présenté, dans ce chapitre, la conception d'une source hybride électrique (Véhicule électrique) constituée de trois sources d'énergie électrique. Ces sources sont : la pile à combustible, les cellules photovoltaïques et les super condensateurs.

Ces sources permettent de fournir de l'énergie électrique sans aucune pollution localisée, mais leurs coûts sont élevés par rapport aux sources d'énergie conventionnelles. Nous intéresserons à la pile à combustible comme source principale grâce à leur énergie spécifique élevée. En effet les cellules photovoltaïques présentent l'avantage de produire de l'énergie électrique à partir de ressources naturelles gratuites (le soleil).

Afin d'améliorer le comportement des systèmes hybrides électriques en régime transitoire, nous utiliserons les super condensateurs comme sources auxiliaires dédiées au stockage de l'énergie électrique.

# CHAPITRE II DIMENSIONNEMENT ET CONCEPTION DES CONVERTISSEURS ASSOCIÉS.

## **II.1. Introduction**

Dans le chapitre précédent nous avons traité de manière générale les principes fondamentaux du véhicule électrique tout en passant par ses sources d'alimentations. Notre véhicule hybride sera alimenté principalement par un pack de piles à combustible et des panneaux solaires comme source secondaire pour l'alimentation des charges de petite puissance tels que : les vitres, les essuie-glaces, etc. et pour le stockage d'énergie nous avons opté pour un super condensateur de type Maxwell.

Dans ce chapitre nous intéresserons principalement par le dimensionnement des différents éléments qui composeront notre véhicule c'est-à-dire le dimensionnement du moteur électrique, de la source (PV), le pack de la pile à combustible, le super condensateur, ainsi le dimensionnement des convertisseurs statiques (Buck et le Buck-boost).

## **II.2. Modélisation des convertisseurs associés**

Les convertisseurs statiques de type DC-DC notamment appeler hacheur sont assez connus grâce à leurs petites tailles mais et leurs 'efficacité par rapport aux régulateurs linéaires. Leurs principaux rôles sont de convertir un niveau de tension électrique à un autre niveau par action de commutation. Les convertisseurs DC-DC ont un très grand domaine d'application. Ceux-ci sont largement utilisés dans les ordinateurs personnels, des périphériques informatiques et adaptateurs d'appareils électroniques pour fournir des tensions continues. Ces types de convertisseurs ont plusieurs topologies, parmi ces dernières on trouve le convertisseur abaisseur (Buck), élévateur (boost) et abaisseur-élévateur (Buck-boost). Dans notre étude nous intéresserons sur le type de convertisseur boost (source FC et la source PV) et le buck-boost (source SC) [42]

- **Modèle mathématique du convertisseur BOOST**

Pour obtenir le modèle mathématique de l'hacheur BOOST notamment appeler hacheur parallèle et en prenant compte du régime de fonctionnement de l'interrupteur K on applique les lois de KIRCHOFF sur le schéma de base de l'hacheur représentée dans la figure suivante

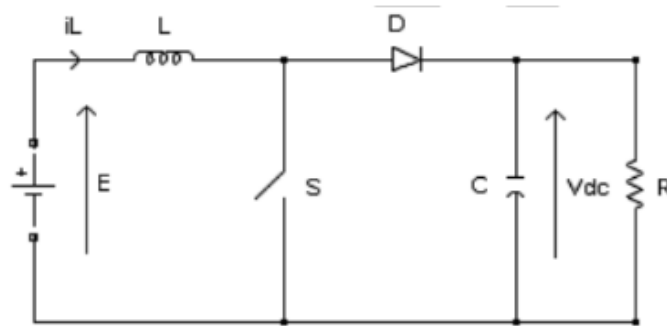


Figure-II-1 : Schéma de principe du hacheur parallèle.

D'après le schéma précédent de principe du hacheur parallèle On appliquant les deux lois de Kirchhoff (loi des mailles et loi des nœuds) on trouve

$$\begin{cases} L \frac{di_L}{dt} = E - V_{dc} (1 - u) \\ C \frac{dV_{dc}}{dt} = I_L (1 - u) - \frac{V_{dc}}{R} \end{cases} \quad (II.1)$$

Les équations dynamique du hacheur sont dérivées pour le courant dans l'inductance et la tension aux bornes du condensateur en régime de conduction continu exprimé en (II.1), ou  $I_L$  est le courant dans la bobine L, E est la tension d'entrée,  $V_{dc}$  est la tension de sortie et u est la commande.

On pose  $x_1 = I_L$  et  $x_2 = V_{dc}$  alors les équations d'état deviennent :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \frac{E}{L} - \frac{x_2(1-u)}{L} \\ \dot{x}_2 = \frac{x_1(1-u)}{C} - \frac{x_2}{RC} \end{cases} \quad (II.2)$$

Alors la représentation classique en espace d'état  $\dot{x} = Ax + Bu$  de (II.2) se transforme en

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{(1-u)}{L} \\ \frac{(1-u)}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} E \quad (\text{II.3})$$

Tableau-II-1 : Tableau récapitulatif de la modélisation du hacheur BOOST.

Les paramètres des systèmes :	Les variables d'état :	Le signal de contrôle :
<p>L'inductance de la bobine L en [H].</p> <p>La capacité du condensateur en [F].</p> <p>La résistance de la charge en [<math>\Omega</math>].</p>	<p>Le courant dans la bobine.</p> <p>La tension aux bornes du condensateur.</p>	<p>u est compris dans le domaine discret de (0, 1) et il indique l'état de l'interrupteur S : ouvert pour 0 et fermé pour 1.</p>

Remarque

Le signal de commande peut être remplacé par sa valeur moyenne sur une période de découpage  $\alpha$  qui représente le rapport cyclique  $\alpha = \frac{T_{on}}{T_s}$  ou  $T_{on}$  est le temps de conduction et  $T_s$  est la période de découpage.[42]

Le logiciel MATLAB nous a permis de faire une modélisation mathématique du convertisseur boost qui sera accordé à la source d'alimentations du véhicule.

La figure (II.2) illustre la réalisation simulink du modèle mathématique du convertisseur boost.

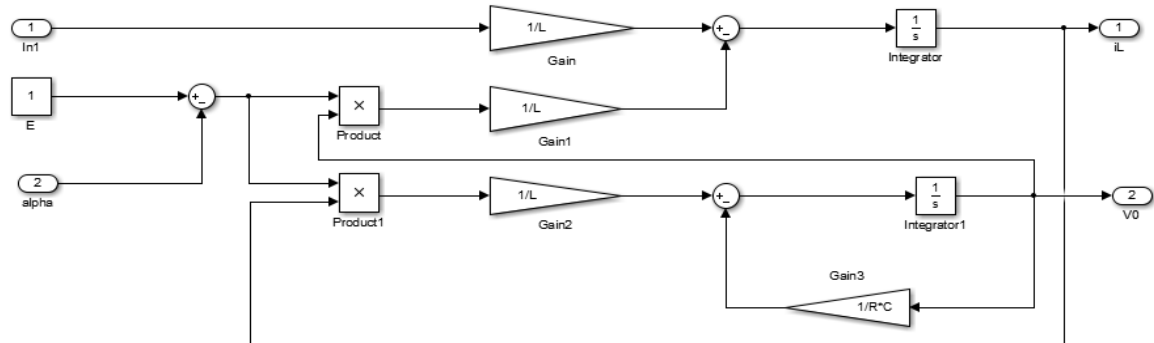


Figure-II-2 : Réalisation Simulink du modèle mathématique de convertisseur BOOST.

• **Modèle mathématique du convertisseur BUCK-BOOST**

Pour obtenir le modèle mathématique de l’hacheur BUCK/BOOST on doit forcément prendre en compte l’état de l’interrupteur S, les deux états de l’interrupteur S sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau II-2: Tableau qui résume les deux états de l’interrupteur S.

L’interrupteur S est passant $T_{on} = \alpha * T_s$	L’interrupteur S est bloqué $T_{off} = (1 - \alpha) * T_s$
L’énergie stockée dans l’inductance augmente	L’énergie accumulée dans l’inductance se transfert vers la capacité de la charge

Le schéma électrique simplifié du convertisseur buck/boost se compose principalement par un interrupteur K d’une bobine mise en parallèle avec la source continue, d’une diode, d’une capacité et d’une charge R pour simplifier sa modélisation mathématique.

Le schéma électrique du convertisseur buck/boost est modélisé dans la figure (II.4) suivante

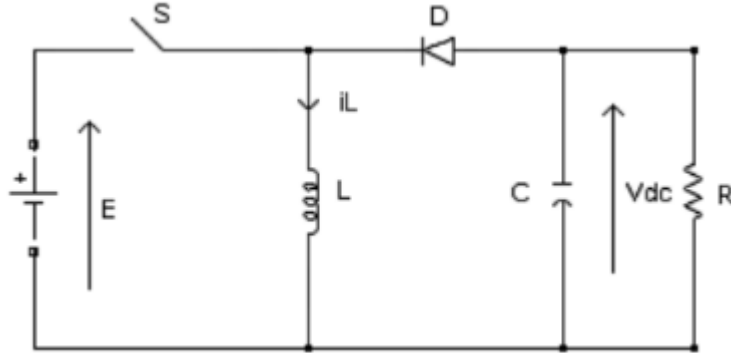


Figure II-3 : Schéma de principe du hacheur BUCK/BOOST.

D'après le schéma précédent de principe de le hacheur parallèle en appliquant les deux lois de Kirchhoff (loi des mailles et loi des nœuds) on trouve :

$$\begin{cases} L \frac{di_L}{dt} = uE + V_{dc} (1 - u) \\ C \frac{dV_{dc}}{dt} = -I_L (1 - u) - \frac{V_{dc}}{R} \end{cases} \quad (II.4)$$

On effectue les mêmes étapes de dérivation des équations dynamiques en régime de conduction continue dans le hacheur BOOST.

En régime interrupteur passant, S est égal à 1, la diode est bloquée et les équations dans ce cas sont

$$\begin{cases} L \frac{di_L}{dt} = uE \\ C \frac{dV_{dc}}{dt} = - \frac{V_{dc}}{R} \end{cases} \quad (II.5)$$

Lorsque l'interrupteur est bloqué, S est égale à 0 et la diode conduit, les équations sont

$$\begin{cases} L \frac{di_L}{dt} = V_{dc} \\ C \frac{dV_{dc}}{dt} = -i_L - \frac{V_{dc}}{R} \end{cases} \quad (II.6)$$

L'application de la méthode d'espace d'état des équations (II.4), (II.5) et (II.6) est représentée dans le système suivant

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -(1-u) \\ \frac{(1-u)}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u \\ 0 \end{bmatrix} E \quad (II.7)$$

Les paramètres des systèmes sont les mêmes que dans le cas de le hacheur BOOST.[42]

La figure (II.4) illustre la réalisation simulink du modèle mathématique du convertisseur buck/boost.

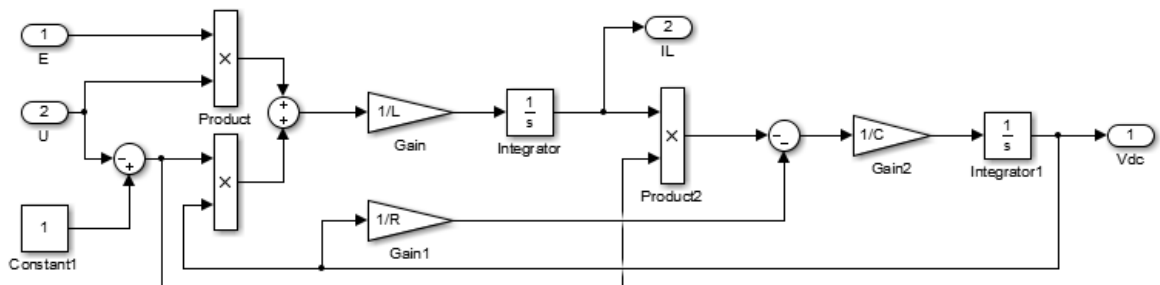


Figure II-4: Réalisation Simulink du modèle mathématique de convertisseur BUCK-BOOST.

### II.3. Dimensionnement du moteur du véhicule électrique

Dans le chapitre I nous avons cité les différents moteurs électriques et leurs contrôleurs associés utilisées dans les véhicules électriques. Le moteur utilisé pour la propulsion de notre véhicule est défini selon le cahier de charge qui nous été confié par notre encadreur, qui est récapitulé dans le tableau suivant :

Tableau II-3 : Récapitulation du cahier de charge pour le dimensionnement du moteur

Charge utile	474 kg
À vide en ordre de marche	1 502 kg
Vitesse maximale	135 km/h
Accélération	De 0-100 km/h en 11,4s
Tension alimentation	120 V
Refroidissement	Par air ambient.
$C_x$	0.75
Technologie moteur électrique	Synchrone à rotor bobiné.

- **Les caractéristiques mécaniques requises pour l'entraînement d'un véhicule roulant**

L'effort total de résistance ( $F_r$ ) à l'avancement que doit vaincre le système de motorisation peut s'écrire sous la forme [43]

$$F_r = F_{roul} + F_{aéro} + M \cdot g \cdot p \% + M \cdot \gamma \quad (II.8)$$

- **Calcul de la force de résistance de roulement**

La force de résistance au roulement est liée au coefficient de roulement des pneus. En pratique, avec des pneumatiques modernes à très faible résistance au roulement, avec une pression de gonflage comprise entre 1,8 et 2,2 daN/cm<sup>2</sup>, le coefficient CRR de résistance au roulement vaut environ  $100.1.10^{-4}$ .

L'effort de résistance au roulement vaut :

$$F_{roul} = C_{RRmoy} \times M \times g \quad (II.9)$$

Avec

$C_{RRmoy}$  Le couple de résistance au roulement, sur le goudron

$$C_{RRmoy} = 0,0024$$

Dont

$g$  est l'accélération de la pesanteur,  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$  et  $M$  est la masse totale en charge (véhicule + tout ce qui est à l'intérieur =  $474+1502=1\ 976 \text{ Kg}$ ).

Donc  $F_{\text{roul}} = 0.0024 \times 1976 \times 9.81 = 46.523 \text{ N}$ .

- **Calcul de la force de résistance aérodynamique**

La force de résistance aérodynamique est proportionnelle à la masse volumique de l'air ( $1,28 \text{ kg/m}^3$ ), au carré de la vitesse relative (compte tenu du vent) par rapport à l'air, à la section frontale  $S^f$  du véhicule et à son coefficient « $c_x$ » de pénétration dans l'air (environ 0,3 à 0,4 habituellement) or il est imposé dans le cahier de charge  $c_x = 0.75$ .

$$F_{\text{aéro}} = (1/2) \times \rho \times v^2 \times C_x \times S^f \quad (\text{II.10})$$

Avec

- $\rho$  est la densité de l'air à l'endroit où l'on se situe,  $\rho = 1,28 \text{ kg/m}^3$ .
- $v$  est la vitesse relative par rapport à l'air.
- $C_x$  est le coefficient de pénétration dans l'air = 0.75.
- $S^f$  est la section frontale de notre véhicule.

Calcul du  $A^f$  : D'après les dimensions du véhicule Renault ZOE on estime la surface frontale à  $A_f = 1.8 \text{ m}^2$

$$\text{Donc } F_{\text{aéro}} = \frac{1}{2} \times 1.28 \times 37.5^2 \times 0.75 \times 1.8 = 1\ 215 \text{ N}.$$

$$F_{\text{aéro}} = 1\ 215 \text{ N}.$$

- **M.g.p % (force d'inclinaison) [11]**

Parmi les forces qui agissent sur le véhicule on a la force d'inclinaison qui se calcule par la multiplication de trois paramètres :  $M.g.p \%$ . Elle représente la force nécessaire pour vaincre une pente à ( $p$  en %). Sur le plat cette force est nulle. Cette force est parallèle au déplacement du véhicule.

Avec

- M est la masse totale en charge (véhicule + tout ce qui est à l'intérieur),  $M = 1976$  kg.
- g est l'accélération de la pesanteur,  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$
- P % est la pente exprimée en pourcentage.
- On prendra la pente maximale que peut vaincre un véhicule

Donc  $M \cdot g \cdot p\% = 1976 \times 9.81 \times 0.2 = 3876.912 \text{ N}$ .

- **M (force d'accélération)**

M est le terme dynamique d'accélération ( $\gamma > 0$  pour une accélération et  $\gamma < 0$  pour une décélération).

Avec

- M est toujours la masse en charge  $M = 1976$  kg.
- $\gamma$  donné Selon le cahier des charges on pour une accélération De 0-100 km/h en 11,4s

On obtient alors  $M \cdot \gamma = 1976 \times 2.437 = 4815.512 \text{ N/s}$ .

A la fin on obtient que  $F_r = 46.523 + 1215 + 3876.912 + 4815.512 = 9953.947 \text{ N}$ .

Le couple nécessaire aux roues pour obtenir cette force

$$C_r = F_r \cdot R_r = [1/2 \cdot \rho \cdot S_f \cdot C_x \cdot v^2 + C_{RRmoy} \cdot M \cdot g + M \cdot g \cdot p\% + M \cdot \gamma] \cdot R_r \quad (\text{II.11})$$

$R_r$  Défini le rayon roue  $= 362 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ .

Le couple  $C_e$  du moteur devra donc être majoré de 20 % pour prendre en compte les différents couples de pertes dans la transmission.

$$C_r = 1,2 \cdot \frac{1}{m} \cdot F_r \cdot R_r \quad (\text{II.12})$$

$$C_r = \frac{1,2 \cdot 1}{m} \cdot [1/2 \cdot \rho \cdot S_f \cdot C_x \cdot v^2 + C_{RRmoy} \cdot M \cdot g + M \cdot g \cdot p\% + M \cdot \gamma] \cdot R_r$$

La transmission finale est assurée par un réducteur de type « courroie crantée pignons ».

Les mécaniciens savent dimensionner ce type de transmission en fonction de la puissance à transmettre. Le plus souhaitable pour que notre moteur ne soit pas trop volumineux, pour ne pas toucher la coque du véhicule. On donne un rapport de réduction  $m = 5$ .

Le rendement de cette transmission est voisin de  $\eta = 85\%$

Soit, pour une accélération et une vitesse maximale sur le plat c'est-à-dire  $p\%=0$

Donc  $F_r = 6\,077.035\text{N}$ .

On aura à la fin  $C_r = 527.972\text{ N.m}$

### Couple moteur

$$C_e = \frac{C_r}{m \cdot \eta} = \frac{527.972}{5 \times 0.85} = 124.229\text{ N.m} \quad (\text{II.13})$$

### Vitesse angulaire

$$\Omega_e = m \cdot \Omega_r \quad (\text{II.14})$$

Tel que

$m$  est le rapport de réduction et  $\Omega_r$  est la vitesse maximale de véhicule en rad/s ou en tr/min.

Le véhicule a une vitesse maximale de  $135\text{ km/h} = 37.5\text{ m/s} = 103.59\text{ rad/s}$  et pour  $m=5$

Alors  $\Omega_e = 5 \times 103.59 = 517.956\text{ rad/s}$ .

### La puissance

Nous pouvons donc choisir le moteur équipant la voiture électrique selon le cahier de charge qui nous a été confié et selon la puissance calculée précédemment.

$$P_e = C_e \cdot \Omega_e = 124.229 \times 517.956 = 64\,381.413\text{W} \quad (\text{II.15})$$

Donc le moteur électrique que doit allimenter notre vehicule sa puissance doit être de  $64\,381.413\text{W}$ .

Tableau II-4: Récapitulation des calculs effectués pour le dimensionnement du moteur électrique

Effort de résistance $F_r$ $= 6\,077.035\text{N}$	$F_{\text{roul}} =$ 46.523 N	Le couple nécessaire aux roues pour obtenir cette force	$C_r = 527.972\text{ N.m}$	Vitesse angulaire $\Omega_e = 517.956$ rad/s.	Puissance du moteur requise= 64 381.413 W
	$F_{\text{aéro}} =$ 1 215N/s				
	$M.g.p \ \% =$ 3 876.912N		$C_e = 124.229\text{N.m}$		
	$M.\gamma =$ 4 815.512 N/s				

#### II.4. Dimensionnement des cellules solaires

Les cellules solaires vont être posées seulement sur la toiture et le capot car ils sont les seuls exposés directement aux rayons solaires, les portes ne seront pas couvertes de cellules solaires à cause de l'ombrage provoqué par le véhicule lui-même.

On prendra les dimensions d'un véhicule de la marque RENAULT ZOE R90 et la cellule choisit pour couvrir la toiture ainsi le capot est de type poly cristallin de la série LWP5BB-157 Le site de vente en ligne le plus connu au monde AMAZON propose ce type de cellule qui présente un excellent rapport qualité/prix. Ces cellules fabriquées en chine proposée à un prix de €0,0707 / Wpces.

Les caractéristiques électriques ( $P_{\text{max}}$ ,  $P_{\text{mppt}}$ ,  $I_{\text{CC}}$ ,  $V_{\text{CO}}$ , ...etc), de température (coefficient de température de la puissance maximale, coefficient de température du circuit ouvert et coefficient de température du courant de court-circuit), ainsi de produit (Dimensions de la face avant et de la face arrière) sont résumé dans le tableau (II.5)

Tableau II-5 : caractéristique de la cellule solaire utilisé.

Modèle	<b>LWP5BB-4,55W</b>
<b>Caractéristiques du Produit</b>	
Type de cellules	Poly cristallin
Dimension	156,75×156,75 mm
Epaisseur de la cellule	220±0,25 mm
Epaisseur de la cellule	200 ± 20 µm
<b>Face avant (-)</b>	
No. de bus bars	5
Largeur des bus bars	0,7 mm
Matériau des bus bars	Argent
Traitement Antireflet	Nitru de silicium
<b>Face arrière (+)</b>	
Nombre de zone de soudure	4
Largeur la de Zone de Soudure	1,7 mm
Matière la de zone de soudure	Argent
Champ de surface arrière (BSF) (BSF)	Aluminium
<b>Caractéristique Electrique (STC)</b>	
Puissance Maximal ( $P_{max}$ )	4,55 W
Tension à Puissance Maximal ( $V_{mpp}$ )	0,538 V
Courant à Puissance Maximum ( $I_{mpp}$ )	8,447 A
Tension Circuit Ouvert ( $V_{OC}$ )	0,634 V
Courant du court-circuit ( $I_{CC}$ )	8,921 A
Efficacité de la Cellule	18,5-18,6 %
Facteur de remplissage (FF)	80,35 %
<b>Caractéristique de Température</b>	
Coefficient Température ( $P_{max}$ )	-0,3767 %/°C
Coefficient Température ( $V_{OC}$ )	-0,3135 %/°C
Coefficient Température ( $I_{CC}$ )	0,0496 %/°C

• Pour la toiture



Figure II-5 : dimension de la toiture du véhicule RENAULT.

- La surface de la toiture =  $941 \times 899 = 845\,959 \text{ mm}^2$ .
- La surface de cellule =  $156,75 \times 156,75 = 24\,570.562\,5 \text{ mm}^2$ .

Donc le nombre de cellules minimal utilisés sur la toiture =  $\frac{\text{Surface de la toiture}}{\text{surface de la cellule}} =$

$$\frac{845\,959}{24\,570.562\,5} = 34.429 \approx 35 \text{ cellules.}$$

Selon les dimensions proposer précédemment les cellules sera posées comme suite :

- Le nombre minimal de cellules utilisés sur la toiture = 35 cellules

Calcul de nombre de cellules misent en série et en parallèle sur la toiture :

- $\frac{\text{longueur du capot}}{\text{longueur de la cellule}} = \frac{941}{156.75} \approx 6$  cellules en série.
- $\frac{\text{largeur du capot}}{\text{largeur de la cellule}} = \frac{899}{156.75} = 5.73 \approx 6$  cellules en parallèle.

D'après le calcul précédent le nombre de cellules nécessaire pour couvrir toute la toiture est **36 cellules**.

- La tension générée des cellules posées sur le capot est de 19.368V

- **Pour le capot**



Figure II-6 : Dimensions du capot du véhicule.

- La surface du capot =  $1\,511 \times 839 = 1\,267\,729 \text{ mm}^2$
- La surface de cellule =  $156,75 \times 156,75 = 24\,570.562\,5 \text{ mm}^2$

Donc le nombre minimal de cellules utilisés sur le capot =  $\frac{\text{Surface du capot}}{\text{surface de la cellule}} =$

$$\frac{1\,267\,729}{24\,570.562\,5} = 51,595 \approx 52 \text{ cellules}$$

Selon les dimensions proposer précédemment les cellules sera posées comme suite :

- Le nombre minimal de cellules utilisé sur le capot est égal à **52 cellules**.

Calcul de nombre de cellules misent en série et en parallèle sur le capot :

$$\text{➤ } \frac{\text{longueur du capot}}{\text{longueur de la cellule}} = \frac{1\ 511}{156.75} = 9.63 \approx 10 \text{ cellules en série.}$$

$$\text{➤ } \frac{\text{largeur du capot}}{\text{largeur de la cellule}} = \frac{839}{156.75} = 5.35 \approx 6 \text{ cellules en parallèle.}$$

D'après le calcul précédent le nombre de cellules nécessaire pour couvrir tout le capot est 60 cellules.

La tension générée des cellules posées sur le capot est de 32.28V

Donc la tension obtenue par toutes les cellules posées sur le capot et la toiture est de 51.648V.

- Le courant total délivré par l'ensemble des cellules posé sur le capot ainsi la toiture est de 135.04 A.

## II.5. Dimensionnement de Pack FC

La puissance électrique brute de l'empilement se calcule par la relation suivante

$$P_{\text{Pile}} = N_{\text{cell}} \cdot V_{\text{FC}} \cdot J \cdot A \quad (\text{II.16})$$

Avec

$P_{\text{Pile}}$  : Puissance électrique brute du stack (W).

$N_{\text{cell}}$  : Nombre de cellules de l'empilement.

$V_{\text{FC}}$  : Tension par cellule (V).

$J$  : Densité de courant ( $\text{A}/\text{cm}^2$ ).

$A$  : Surface des cellules ( $\text{cm}^2$ ).

$V_{FC}$  et  $J$  sont liées par la caractéristique tension/courant de la pile, tel que :

$$U_{stack} = N_{cell} \cdot V_{FC} \quad (II.17)$$

$$I_{stack} = A \cdot J \quad (II.18)$$

On prend  $U_{stack}$  La plus élevée, et  $I_{stack}$  le plus faible possible car cela limite les pertes Joule dans la cellule.

### ➤ Détermination de nombre des cellules

La pile à combustible est connectée à un convertisseur statique de type « boost » qui doit générer une tension de bus de 120V. Pour des raisons de rendement, le gain de ce convertisseur est limité à deux, donc il faut que la tension de pile soit au minimum de 60V. Ce qui donne un nombre de cellules de

$$N_{cell} = \frac{U_{stack-ch}}{E_{ch}} = \frac{V_{bus}/2}{E_{ch}} \quad (II.19)$$

$$N_{cell} = \frac{60}{E_{ch}} = 94 \text{ cellules.}$$

Avec  $V_{bus}$  : Tension du bus soit 120V et  $U_{stack-ch}$  : Tension du stack en pleine charge soit  $U_{stack-ch} = V_{bus} / 2$  (II.20)

$V_{bus}$  : Tension du bus soit 120V. On trouve donc  $U_{stack-ch} = 60V$ .

$E_{ch}$  : Tension de la cellule en pleine charge soit  $E_{ch} = 0.64V$ .

### ➤ Détermination de la surface des cellules

La pile à combustible représente la source primaire qui alimente notre véhicule électrique. Par conséquent la puissance de la pile à combustible devra être égale à la puissance du moteur pour le faire fonctionner  $P_{Pile} = P_{moteur} = 64381.413 \text{ W}$ .

Pour tenir compte de la consommation des auxiliaires ( $10\% P_{\text{utile}}$ ), il convient de surdimensionner la pile, pour arriver à une puissance brute de  $P_{\text{Pile-max}} = 72\text{kW}$ .

$$P_{\text{Pile-max}} = (1+0.1) P_{\text{utile-max}} \quad (\text{II.21})$$

$$P_{\text{Pile-max}} = 1.111 \times 64.4 = 72\text{KW}.$$

Il est maintenant possible de déterminer les autres paramètres de l'empilement

$$I_{\text{pac-max}} = \frac{P_{\text{Pile-max}}}{U_{\text{stack-ch}}} \quad (\text{II.22})$$

On trouve alors que  $I_{\text{pac-max}}$  égal à 1 200A.

$$A = \frac{I_{\text{pac-max}}}{j} = 2\,000 \text{ cm}^2. \quad (\text{II.23})$$

Avec  $P_{\text{utile-max}}$  : Puissance utile maximale soit 64.8kW et  $I_{\text{pac-max}}$  le courant maximal correspondant à  $P_{\text{Pile-max}}$ .

Cette surface élevée de cellule peut être obtenue par la mise en parallèle (d'un point de vue électrique et hydraulique) de plusieurs stacks ce qui permet d'avoir des surfaces de cellules plus faibles et de tenir compte des limites technologiques. Il est envisageable aussi de décomposer l'assemblage série des cellules en plusieurs stacks comportant un nombre de cellule plus faible. Ces stacks seraient placés en série électriquement, mais en parallèle d'un point de vue hydraulique.

## II.6. Dimensionnement des supercondensateurs

Pour le dimensionnement du super condensateur nous avons opté pour la marque MAXWELL. Le fabricant de cette marque a commencé avec la gamme de 2.3V, d'une capacité ne dépassant pas les 3 600F et un courant de 400A. La deuxième gamme utilise une tension nominale de 2.5V ce qui induit à une augmentation de l'énergie stockée et

leur puissance spécifique et assez amélioré car leur résistance série est faible. Aussi plusieurs améliorations ont été effectuées sur ce produit tel que la gamme un de 5000 F qui atteint une puissance spécifique de 7,4 kW/kg et une énergie spécifique de 5,1 Wh/kg. Ces résultats ouvrent des perspectives certaines pour construire des systèmes de stockage plus efficaces. Enfin, les composants les plus récents ont une tension nominale de fonctionnement qui atteint actuellement 2.7V. Cette dernière sera utilisée comme source principale pour l'alimentation de notre véhicule. [44]



Figure II-7 : super condensateur de 3000F.

Tableau II-6 : Tableau des paramètres du SC.

Tension	2.7V
Capacité	3000F
Durée de vie	Jusqu'à 8 millions à 120 millions de cycles.
Haute puissance	Jusqu'à 6 700 W/kg.
Durée de charge	10 secondes jusqu'à 10 minutes pour atteindre sa capacité maximale de plus de 95 %.
Poids	550 grammes.

Comme première étape on doit calculer l'énergie cinétique du véhicule comme suite

$$\text{➤ } E_C = \frac{1}{2} \times M \times V^2 \quad (\text{II.24})$$

$$\text{➤ } E_C = \frac{1}{2} \times 1\,976 \times 37.5^2 = 1\,389\,375 \text{ J} = 0.3\,859\,375 \text{ Kwh.}$$

La capacité du module (pack) ce calcul par la relation suivante :

$$\text{➤ } C_{\text{pack}_{sc}} = \left( \frac{2}{U^2} \times E_C \right) \times \frac{4}{3} \quad (\text{II.25})$$

$$C_{\text{pack}_{sc}} = \left( \frac{2}{48^2} \times 1\,389\,375 \right) \times \frac{4}{3} = 1\,608.073 \text{ F.}$$

Pour trouver le nombre du super condensateur mis en série et en parallèle on applique les deux formules suivantes :

$$\text{➤ } N_s = \frac{U_{\text{max}}}{V_{\text{cell}}} \quad (\text{II.26})$$

$$N_s = \frac{48}{2.7} = 17.77 \approx 18 \text{ cellules en série.}$$

$$\text{➤ } N_p = \frac{N_s}{C_{sc}} \times C_{\text{pack}_{sc}} \quad (\text{II.27})$$

$$N_p = \frac{18}{3\,000} \times 1\,608.073 = 9.648 \approx 10 \text{ cellules en parallèle.}$$

Alors on prend 18 super condensateurs en série et 10 super condensateurs en parallèles.

En parallèle les capacités des super condensateurs s'additionnent tel que

$$C_1 = 10 \times 3\,000 = 30\,000 \text{ F.}$$

En série les capacités diminuent et se calcul selon la formule suivante :

$$C_2 = \frac{C_{\text{cell}}}{N_s} = \frac{3\,000}{18} = 166.666 \text{ F.}$$

Le nombre total des éléments  $N_{\text{tot}} = N_s \times N_p = 18 \times 10 = 180$  supercondensateurs.

Le poids total des super condensateurs :  $180 \times 0.550 = 99 \text{ Kg.}$

Le temps nécessaire pour que le véhicule atteigne sa vitesse maximale à puissance constante et d'après le cahier des charges on a :  $\Delta T = 11.5 \text{ s}$  pour  $[0 - 100 \text{ km/h}]$ .

$\Delta T$  pour la vitesse maximale 135 km/h.

$$\text{On sait que : } E_{\text{pack}_{sc}} = N_{\text{tot}} \times \frac{1}{2} \times C_{\text{pack}_{sc}} \times U^2 = \frac{180}{2} \times 3\,000 \times 2.7^2$$

$$E_{\text{pack}_{sc}} = 1968300 \text{ J.} = 546.75 \text{ Wh}$$

$$\text{Donc : } T = \frac{E_{\text{pack}_{\text{sc}}}}{P_{\text{moteur}}} = \frac{1\,968\,300 \text{ w.s}}{64\,381.413 \text{ w}} = 30.57 \text{ s.}$$

La résistance du module se calcul on appliquant la formule suivante

$$\text{➤ } R_{\text{pack}_{\text{sc}}} = \frac{N_s}{N_p} \times R_{\text{sc}} \quad (\text{II.28})$$

$$R_{\text{pack}_{\text{sc}}} = \frac{18}{3\,050} \times 2.1 \times 10^{-3} = 1.2393 \times 10^{-5} \Omega.$$

La puissance fournit par le pack de super condensateurs et en partant du tableau des données du super condensateur on trouve  $P_{\text{pack}} = 663\,300 \text{ W}$

$$\text{Calcul du courant du pack } I_{\text{pack}_{\text{sc}}} = N_p \times I_{\text{SC}} = 10 \times \frac{6\,700 \times 0.55}{2.7}.$$

$$I_{\text{pack}_{\text{sc}}} = 13\,648.148 \text{ A}$$

## II.7. Dimensionnement du bus continu et convertisseurs associés aux sources

Le tableau (II.7) présente le cahier de charge qui nous a été confié par notre encadreur et qui tient compte que l'énergie électrostatique au niveau du bus continu doit être constante.

Tableau II-7 : Cahier de charge du système convertisseur.

La tension référence du bus continu	120V
La tension de référence des super condensateurs	48V
L'erreur statique acceptable au niveau de la tension de sortie	[-1.5÷ 1.5V]
La fréquence de découpage	12khz
La capacité du bus continu $C_{\text{bus}}$	3200uF
L'ondulation de tension	2%
L'ondulation de courant	15%

### II.7.1. Convertisseur Boost

- **Convertisseur Boost pour la source FC**

➤ Le rapport de conversion :

$$V_0 = \langle V_0(t) \rangle = \frac{V_{in}}{1-\alpha} \quad (II.29)$$

$$\alpha = 1 - \frac{60}{120} = \frac{1}{2}$$

Le rapport cyclique " $\alpha$ " correspond à la durée relative sur la période de la conduction de l'interrupteur commandé S.

$V_0$  : La tension de sortie ou tension du bus continu  $V_0 = \frac{60}{1-\alpha} = 120V$ .

$V_{in}$  : La tension d'entrée du convertisseur (tension de la FC)  $V_{in} = U_{stack-ch} = 60V$ .

➤ Le courant de sortie

Le courant de sortie est donné par l'équation suivante

$$I_0 = \langle i_0(t) \rangle = \frac{1}{T_D} \int_{\alpha T_D}^{T_D} I_E dt \quad (II.30)$$

Si on estime que le courant d'entrée est parfaitement continu, on peut écrire que :

$$I_0 = I_E (1-\alpha) \quad (II.31)$$

$$I_0 = 600A.$$

Avec  $I_0$  : Courant de sortie du convertisseur (A) et  $I_E$  : Courant d'entrée du convertisseur  $I_E = I_{pac-max} = 1200A$ .

➤ Calcul de l'inductance :

L'ondulation absolue du courant  $I_L$  est déterminée par la relation :

$$\Delta I_L = I_{Lmax} - I_{Lmin} = \frac{\alpha V_{in}}{L \cdot f} = \frac{\alpha V_o (1-\alpha)}{L \cdot f} \quad (II.32)$$

Où

$I_{Lmax}$  et  $I_{Lmin}$  sont la valeur maximale et minimale du courant d'inductance.

$\Delta I_L$  : L'ondulation de courant soit 15.

L : Inductance (H).

f : La fréquence de commutation  $f = 12\text{KHZ}$ .

D'après l'expression de  $\Delta I_L = \frac{\alpha V_{in}}{L \cdot f}$  on remarque que quand la fréquence de commutation "f" ou la valeur de l'inductance "L" augmente. L'ondulation du courant diminue.

Pour un rapport cyclique  $\alpha = \frac{1}{2}$ , l'ondulation de courant est maximale car :

$$\frac{d\Delta I_L}{d\alpha} = 0 \text{ Pour : } \alpha = \frac{1}{2}$$

L'ondulation maximale est donc donnée par :  $\Delta I_{Lmax} = \frac{V_o}{4 \cdot L \cdot f}$  (II.33)

Le calcul de l'inductance L en fonction de l'ondulation maximale, s'effectue à l'aide l'équation suivante

$$L \geq = \frac{V_o}{4 \cdot \Delta I_{Lmax} \cdot f} \quad (II.34)$$

Donc l'inductance minimale pour un hacheur survolteur est donnée par la relation

$$L = \frac{V_o}{4 \cdot \Delta I_{Lmax} \cdot f} = \frac{120}{4 \times 0.15 \times 12000} = 16.66\text{mH.}$$

➤ Courants moyens

Le courant moyen de l'interrupteur S

$$I_T = \langle I_T \rangle = I_E = 1200A.$$

Le courant moyen de la diode D

$$I_D = \langle I_D \rangle = I_0 = 600A.$$

➤ Courants efficaces :

Le courant efficace de l'interrupteur S

$$I_{S,eff} = \sqrt{\left(\left(\frac{I_0}{1-\alpha}\right)^2 + \frac{\Delta I_L^2}{12}\right)} \cdot (\alpha) \quad (II.35)$$

$$I_{S,eff} = 848.53A.$$

Le courant efficace de la diode

$$I_{D,eff} = \sqrt{\left(\left(\frac{I_0}{1-\alpha}\right)^2 + \frac{\Delta I_L^2}{12}\right)} \cdot (1-\alpha) \quad (II.36)$$

$$I_{D,eff} = 848.53A.$$

➤ Tension maximale supportée par l'interrupteur S et la diode D

$$V_{Smax} = |V_{Dmax}| = \frac{V_{in}}{1-\alpha} + \frac{\Delta V_s}{2} \quad (II.37)$$

$$V_{Smax} = 120.01V.$$

➤ Courant maximal supporté par l'interrupteur S et la diode D

$$i_{Smax} = |i_{Dmax}| = \frac{I_0}{1-\alpha} + \frac{\Delta I_L}{2} \quad (II.38)$$

$$i_{Smax} = 1200.075A.$$

➤ Le rendement du convertisseur

$$\eta_c = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{P_{bus}}{P_{pac}} \quad (II.39)$$

$$\text{Tel que : } P_{out} = P_{bus} = V_{bus} \cdot I_{bus} \quad (II.40)$$

$$P_{out} = 120 \times 600 = 72000W.$$

$$P_{in} = P_{pac} = V_{pac} \cdot I_{pac} \quad (II.50)$$

$$P_{in} = 72000W$$

$$\eta_c = \frac{72000}{72000} = 1.$$

- **Convertisseur Boost pour la source PV**

Pour le calcul du dimensionnement du convertisseur Boost pour la source (PV) on effectue les mêmes étapes de calcul précédentes de la source (FC)

➤ Le rapport de conversion

$$V_0 = \langle V_0(t) \rangle = \frac{V_{in}}{1-\alpha} = \frac{51.648}{1-\alpha} = 120V.$$

$$\alpha = 1 - \frac{51.648}{120} = 0.6.$$

➤ Le courant de sortie

Le courant de sortie est donné par l'équation suivante :

$$I_0 = \langle i_0(t) \rangle = \frac{1}{T_D} \int_{\alpha T_D}^{T_D} I_E dt$$

$$I_0 = I_E (1-\alpha).$$

$$I_0 = 54.02V.$$

$$\text{Avec: } I_E = I_{pv} = 135.04A.$$

➤ Calcul de l'inductance

L'ondulation absolue du courant  $I_L$  est déterminée par la relation

$$\Delta I_L = I_{Lmax} - I_{Lmin} = \frac{\alpha V_{in}}{L \cdot f} = \frac{\alpha V_0 (1-\alpha)}{L \cdot f}$$

L'inductance minimale pour un hacheur survolteur est donnée par la relation

$$L = \frac{\alpha V_0 (1-\alpha)}{\Delta I_L \cdot f} = \frac{0.6 \times 120 \times (1-0.6)}{0.15 \times 12000} = 16mH.$$

➤ Courants moyens

Le courant moyen de l'interrupteur S

$$I_T = \langle I_T \rangle = I_E = 135.04A.$$

Le courant moyen de la diode D

$$I_D = \langle I_D \rangle = I_0 = 54.02A$$

➤ Courants efficaces

Le courant efficace de l'interrupteur S

$$I_{S,eff} = \sqrt{\left(\left(\frac{I_0}{1-\alpha}\right)^2 + \frac{\Delta I_L^2}{12}\right) \cdot \alpha} = 104.61A.$$

Le courant efficace de la diode

$$I_{D,eff} = \sqrt{\left(\left(\frac{I_0}{1-\alpha}\right)^2 + \frac{\Delta I_L^2}{12}\right) \cdot (1-\alpha)} = 85.41A.$$

- Tension maximale supportée par l'interrupteur S et la diode D

$$V_{S\max} = |V_{D\max}| = \frac{V_{in}}{1-\alpha} + \frac{\Delta V_s}{2} = 129.13V.$$

- Courant maximal supporté par l'interrupteur S et la diode D

$$i_{S\max} = |i_{D\max}| = \frac{I_0}{1-\alpha} + \frac{\Delta I_L}{2} = 135.06A.$$

- Le rendement du convertisseur

$$\eta_c = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{P_{bus}}{P_{pv}}$$

$$\text{Tel que : } P_{out} = P_{bus} = V_{bus} \cdot I_{bus} = 120 \times 54.02 = 6482.4W.$$

$$P_{in} = P_{pv} = V_{pv} \cdot I_{pv} = 6974.55W$$

$$\eta_c = \frac{16204.8}{6974.55} = 92.94\%.$$

## II.7.2. Convertisseur Buck-Boost

- Pour la source SC

- Le rapport de conversion

$$V_0 = \langle V_0(t) \rangle = \frac{\alpha}{1-\alpha} V_{in}$$

$$V_0 = \frac{\alpha}{1-\alpha} \cdot 48 = 120V$$

$$\alpha = 0.71.$$

- Le courant de sortie

Le courant de sortie est donné par l'équation suivante

$$I_0 = \langle i_0(t) \rangle = \frac{1}{T_D} \int_{\alpha T_D}^{T_D} I_E dt$$

$$I_0 = I_E (1-\alpha) = 13\,648.14 \times (1-0.71)$$

$$I_0 = 3\,957.96\text{A.}$$

➤ Calcul de l'inductance

L'ondulation absolue du courant  $I_L$  est déterminée par la relation

$$\Delta I_L = I_{L\max} - I_{L\min} = \frac{\alpha V_{in}}{L \cdot f} = \frac{(1-\alpha) V_0}{L \cdot f}$$

L'inductance minimale pour un hacheur survolteur est donnée par la relation

$$L = \frac{(1-\alpha) V_0}{\alpha \cdot \Delta I_L \cdot f} = \frac{(1-0.71) \times 120}{0.15 \times 12000} = 19.33\text{mH.}$$

Avec  $\Delta I_{L\max}$  l'ondulation maximale de courant.

➤ Courants moyens

➤ Le courant moyen de l'interrupteur S

$$I_T = \langle I_T \rangle = I_E = 13\,648.14\text{A.}$$

Le courant moyen de la diode D

$$I_D = \langle I_D \rangle = I_0 = 3\,957.96\text{A.}$$

➤ Courants efficaces

Le courant efficace de l'interrupteur S

$$I_{S,\text{eff}} = \sqrt{\left(\left(\frac{I_0}{1-\alpha}\right)^2 + \frac{\Delta I_L^2}{12}\right)} \cdot (\alpha) = 13\,648.13\text{A}$$

Le courant efficace de la diode

$$I_{D,\text{eff}} = \sqrt{\left(\left(\frac{I_0}{1-\alpha}\right)^2 + \frac{\Delta I_L^2}{12}\right)} \cdot (1-\alpha) = 13\,648.138\text{A}$$

- Tension maximale supportée par l'interrupteur S et la diode D

$$V_{S\max} = |V_{D\max}| = \frac{V_{in}}{1-\alpha} + \frac{\Delta V_s}{2} = 165.53V$$

- Courant maximal supporté par l'interrupteur S et la diode D

$$i_{S\max} = |i_{D\max}| = \frac{I_0}{1-\alpha} + \frac{\Delta I_L}{2} = 13\,657.80A.$$

- Le rendement du convertisseur

$$\eta_c = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{P_{bus}}{P_{sc}}$$

$$\text{Tel que : } P_{out} = P_{bus} = V_{bus} \cdot I_{bus} = 120 \times 3\,957.96A = 474\,955.2W.$$

$$P_{in} = P_{sc} = V_{sc} \cdot I_{sc} = 48 \times 13648.14 = 36\,849.978W.$$

$$\eta_c = \frac{47496}{65510.88} = 72.5\%.$$

Le tableau suivant résume les calculs de dimensionnement des convertisseurs statiques utilisés pour les trois sources (FC, PV, SC)

Tableau II-8 : Récapitulation des calculs effectués pour le dimensionnement des convertisseurs statiques.

Les sources	Source FC (Boost)	Source SC (Buck-Boost)	Source PV (Boost)
Puissance de sortie	72000W	474 955.2W	6974.55W
Courant de sortie	600A	3 957.96A A	54.02A
Rapport cyclique	0.5	0.71	0.6
Courant efficace de l'interrupteur	848.53A	13 648.13A	104.61A

Courant efficace de la diode	848.53A	13 648.138A	85.41A
Tension maximale supportée par l'interrupteur "S" et la diode "D"	120.01V	165.53V	129.13V
Courant maximal supporté par l'interrupteur S et la diode D	1200.075A	13657.80A	135.06A
Valeur de l'inductance L	16.66Mh	19.33mH	16mH
Le rendement	1	0.725	0.9294
L'ondulation de tension	0.02	0.02	0.02
L'ondulation de courant	0.15	0.15	0.15

## II.8. Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté la conception et le dimensionnement d'un véhicule hybride constitué d'une pile à combustible (source primaire), de panneaux photovoltaïques (source secondaire) et de super condensateurs. Le dimensionnement du moteur du véhicule et des différents éléments des convertisseurs a été détaillé.

On a maintenant trois sources pouvant : fournir (pour la pile à combustible et les panneaux photovoltaïques) et échanger (pour les super condensateurs) de l'énergie avec le bus continu. Il reste à définir l'algorithme de gestion des échanges d'énergie entre la

source hybride ainsi créée et le bus continu c'est-à-dire le contrôle du système hybride étudié. Ceci est l'objet du prochain chapitre.

**CHAPITRE III MODÉLISATION  
ET CONTRÔLE DU SYSTÈME  
HYBRIDE ÉTUDIÉ.**

### **III.1. Introduction**

Surtout que les énergies renouvelables présentent plusieurs avantages sur l'impact environnemental et industriel. Mais elles présentent toujours un problème majeur qui est le problème de l'intermittence c'est-à-dire que ces énergies dépendent des conditions et des variations climatiques, et c'est de là que vient le rôle des sources dites sources de seconde génération a noté principalement la pile à combustible qui. Il est bien connu que les systèmes hybrides qui contiennent plus d'une seule source de première génération peut être considéré comme un système performant. Souvent deux sources d'énergies renouvelables ou plus sont nécessaires afin d'assurer que le système est plus stable et bien rentable. [45]

Dans les systèmes de transport, les chercheurs se trouvent toujours face à des problèmes qui nuisent à la performance de ce type de système. Parmi ces problèmes la commande et la gestion d'énergie. Or ces deux problèmes ont connu un développement assez intéressant, car de nos jours les systèmes sont de plus en plus stables ainsi leurs bonnes gestion d'énergie.

Pour la commande de notre véhicule nous allons nous intéresser à une nouvelle stratégie de commande dédiée aux systèmes embarqués à courant continu. L'algorithme de contrôle basé sur la notion de platitude différentielle est étudié pour gérer la stabilité de la tension du véhicule ainsi sa gestion d'énergie.

Dans ce travail, la commande par platitude a été utilisée pour la gestion de l'énergie du système hybride. Pour la stabilisation énergétique du système on fait appel à un contrôleur PI (Proportional integrator) pour assurer la régulation du courant dans le convertisseur Boost de la source primaire FC. Le contrôle par platitude (flatness control) a été employé également pour la régulation de la tension du bus continu, la

stabilisation du système et le contrôle de l'état de charge du super condensateur et cela à l'aide d'un algorithme bien défini. Ces trois contrôleurs doivent interagir entre eux afin d'assurer la stabilité énergétique du système hybride proposé.

## III.2. Sources d'alimentation hybrides

### III.2.1. Structure des convertisseurs de puissance

Les modules d'alimentation FC et PV sont fréquemment combinés avec des convertisseurs boost et la source SC a des convertisseurs bidirectionnels buck-boost.

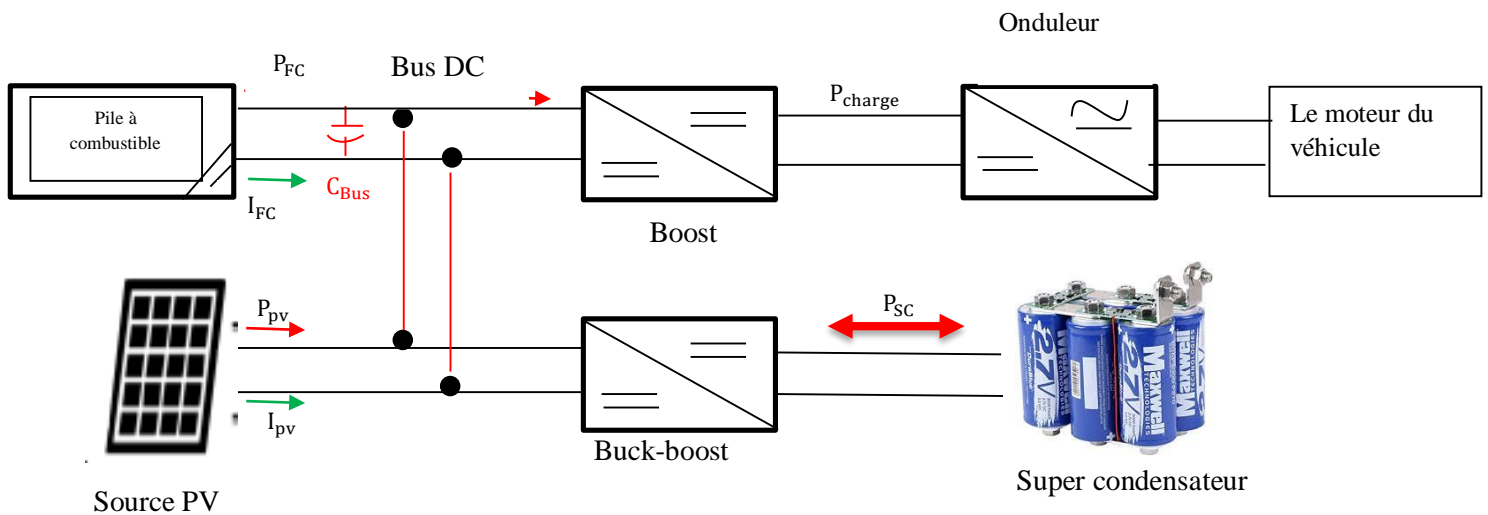


Figure III-1: Schéma du système hybride FC-PV-SC proposé

La figure (III.1) illustre un schéma récapitulatif du système hybride proposé, La pile à combustible et la source photovoltaïque présenterons les sources d'alimentation du véhicule hybride, chacune de ses sources sera lié à un convertisseur boost. Le supercondensateur est l'élément de stockage de l'énergie du véhicule, cet élément de stockage sera liés à un convertisseur de type buck/boost

Pour la sécurité et la dynamique élevée, les convertisseurs PV, FC, et SC sont principalement contrôlés par des boucles de régulation de courant interne. Et pour assurer la stabilité du système et la dynamique de la régulation interne, les boucles sont également supposées être synchronisées avec les boucles de commande extérieures. Ces boucles de contrôle du courant sont ajusté par trois signaux de références donnés dans les équations (III.5) (III.6) (III.7), et générées par les lois de contrôles présentées ci-après [46]

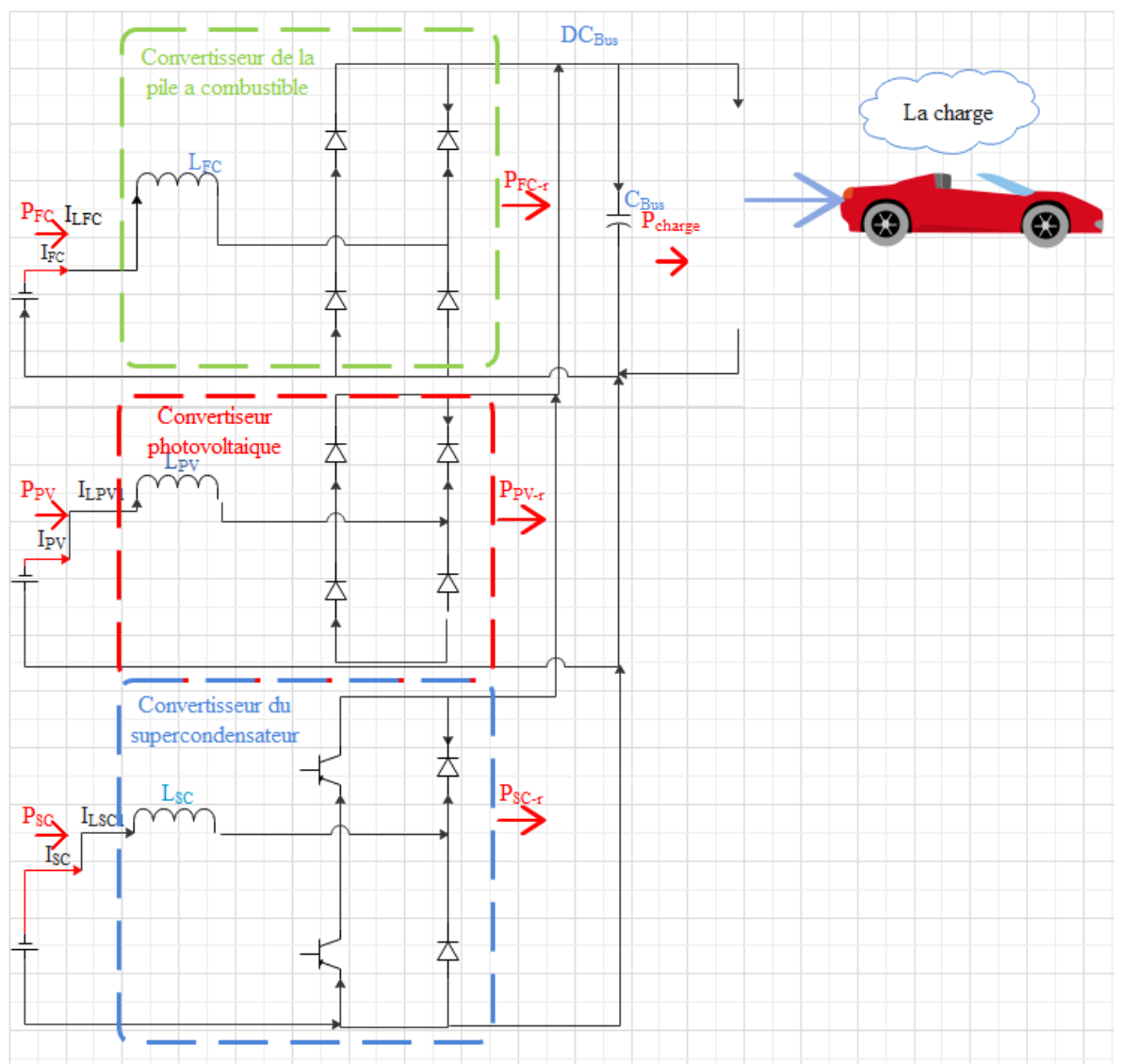


Figure III-2: schéma de principe de l'alimentation d'un véhicule hybride FC, PV et SC proposé

### III.2.2. Modélisation du système hybride

Les équations différentielles des convertisseurs buck-boost monophasé pour le SC, boost monophasé pour la FC et le PV lorsque le convertisseur fonctionne en mode de conduction continue peuvent être exprimés comme suivant :[47]

$$\frac{di_{FC}}{dt} = \frac{1}{L_{LFC}} [V_{FC} - (1 - d_{FC})V_{Bus} - r_{LFC} \times i_{LFC}] \quad (III.1)$$

$$\frac{di_{PV}}{dt} = \frac{1}{L_{LPV}} [V_{PV} - (1 - d_{PV})V_{Bus} - r_{PV} \times i_{LPV}] \quad (III.2)$$

$$\frac{di_{SC}}{dt} = \frac{1}{L_{LSC}} [V_{SC} - (1 - d_{SC})V_{Bus} - r_{LSC} \times i_{LSC}] \quad (III.3)$$

$$\frac{di_{V_{Bus}}}{dt} = \frac{1}{C_{Bus}} [(1 - d_{FC})i_{LFC} + (1 - d_{PV})i_{LPV} + (1 - d_{SC})i_{LSC} - i_{charge}] \quad (III.4)$$

Où :  $i_{charge}$  : Le courant de charge.

$V_{SC}$  : La tension de supercondensateur.

$V_{FC}$  : La tension de la pile à combustible.

$V_{PV}$  : La tension de la source PV.

$i_L$  : Le courant d'inductance.

$C_{Bus}$  : La capacité totale du réseau DC.

$L$  : l'inductance.

$r_L$  : est la résistance parasite de l'inductance.

$d$  : est le rapport cyclique contrôlé de la modulation de largeur d'impulsion (PWM) pour le circuit de puissance.

Ce modèle est simplifié pour effectuer ce travail car il ne prend pas en compte certains types de pertes généralement rencontrées dans les convertisseurs DC – DC (pertes dynamiques, temps mort de commutation, etc.).

Nous considérons que les courants PV, FC et SC suivent leurs signaux de référence parfaitement. Ceci est une hypothèse classique utilisée dans la structure de contrôle en cascade afin d'estimer la boucle de contrôle. Cependant, l'erreur d'hypothèse sera compensée par la boucle de commande externe.

Par conséquent, la référence de courant peut être donnée par les équations :[47]

$$I_{FC} = i_{FCREF} = \frac{P_{FC}}{V_{FC}} = \frac{P_{FCREF}}{V_{FC}} \quad (III.5)$$

$$I_{PV} = i_{PVREF} = \frac{P_{PV}}{V_{PV}} = \frac{P_{PVREF}}{V_{PV}} \quad (III.6)$$

$$I_{SC} = i_{SCREF} = \frac{P_{SC}}{V_{SC}} = \frac{P_{SCREF}}{V_{SC}} \quad (III.7)$$

Où :  $P_{FC}$  ,  $P_{PV}$  et  $P_{SC}$  sont la puissance générée du système hybride FC-PV-SC.

et :  $I_{FC}$  ,  $I_{PV}$  ,  $I_{SC}$  sont le courant de la pile à combustible, de la source photovoltaïque et de super condensateur respectivement.

L'énergie stocké  $E_{Bus}$  dans le lien DC s'exprime par :

$$E_{Bus} = \frac{1}{2} \times C_{Bus} \times V_{Bus}^2 \quad (III.8)$$

Aussi, l'énergie stockée dans le super condensateur se donne par la relation suivante :

$$E_{SC} = \frac{1}{2} \times C_{SC} \times V_{SC}^2 \quad (III.9)$$

A partir des relations (8) et (9) on aboutit à la relation qui exprime l'énergie électrostatique totale  $E_{tot}$

$$E_{tot} = \frac{1}{2} \times C_{Bus} \times V_{Bus}^2 + \frac{1}{2} \times C_{SC} \times V_{SC}^2 \quad (III.10)$$

En analysons la figure (2), l'énergie capacitive ( $E_{Bus}$ ) du lien DC peut être exprimé en fonction de  $P_{FC-r}$ ,  $P_{PV-r}$ ,  $P_{SC-r}$  et de  $P_{Charge}$  par les équations différentielles suivantes :[46]

$$\dot{E}_{Bus} = P_{FC-r} + P_{PV-r} + P_{SC-r} - P_{Charge} \quad (III.11)$$

Dont :

$$P_{FC-r} = P_{FC} - r_{FC} \times I_{FC}^2 = P_{FC} - r_{FC} \times \left(\frac{P_{FC}}{V_{FC}}\right)^2 \quad (III.12)$$

$$P_{PV-r} = P_{PV} - r_{PV} \times I_{PV}^2 = P_{PV} - r_{PV} \times \left(\frac{P_{PV}}{V_{PV}}\right)^2 \quad (III.13)$$

$$P_{SC-r} = P_{SC} - r_{SC} \times I_{SC}^2 = P_{SC} - r_{SC} \times \left(\frac{P_{SC}}{V_{SC}}\right)^2 \quad (III.14)$$

Et l'énergie demandée par la charge peut s'exprimer par la relation suivante :

$$P_{Charge} = V_{bus} \times I_{load} = \sqrt{\frac{2E_{Bus}}{C_{Bus}}} \times I_{charge} \quad (III.15)$$

Aussi, la puissance délivrée par le super condensateur :

$$P_{SC} = V_{SC} \times I_{SC} = \sqrt{\frac{2E_{SC}}{C_{SC}}} \times I_{SC} \quad (III.16)$$

Où :  $r_{FC}$ ,  $r_{PV}$ , et  $r_{SC}$  représentent respectivement les seules pertes statiques dans les convertisseurs de la FC, PV, et SC.

### III.3. Le contrôle par platitude

L'avantage de cette approche est que les trajectoires du système sont totalement estimées par les trajectoires d'une sortie plate et ses dérivés sans inclure aucune équation différentielle. Actuellement, ces idées ont récemment été utilisées dans une variété de systèmes non linéaires à travers différentes disciplines d'ingénieries telles que le véhicule hybride, l'espace contrôle du robot, et les systèmes hybrides de génération renouvelable. Aussi les systèmes plats conviennent également dans les situations où la génération de trajectoire est nécessaire. Le comportement des systèmes plats peut être donné par sa sortie. Il est donc possible de concevoir la trajectoire souhaitée des sorties et déterminer le système de contrôle.

#### III.3.1. Démonstration de la platitude du système hybride proposée

Un système d'équations différentielles conventionnelles est supposé différentiellement plat s'il peut être modélisé comme suite : [45]

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x, u) \\ u = [u_1, u_2, u_3, \dots, u_m]^T \quad u \in \mathbb{R}^m \\ x = [x_1, x_2, x_3, \dots, x_n]^T \quad x \in \mathbb{R}^n \\ y = [y_1, y_2, y_3, \dots, y_m]^T \quad y \in \mathbb{R}^m \end{cases} \quad (\text{III.17})$$

Avec :  $x$  est le vecteur des variables,  $u$  est l'entrée de commande,  $y$  est le vecteur des sorties plates et  $(n, m) \in \mathbb{R}^2$ .

Le vecteur  $y$  peut être écrit en fonction de  $x$  comme suite : [45]

$$y = \Phi(x, u, \dot{u}, \dots, u^{(s)}) \quad (\text{III.18})$$

Dont  $(s)$  détermine le nombre de dérivation.

Les vecteurs  $x$  et  $u$  peuvent être exprimé en utilisant le vecteur des sorties plates  $y$  et le nombre fini de ses dérivés comme suite :

$$\begin{cases} \dot{x} = \varphi(y, y, \dots, \dot{y}^r) \\ u = \psi(y, y, \dots, \dot{y}^{r+1}) \end{cases} \quad (\text{III.19})$$

Où  $r$  est le nombre prédéterminé des dérivées.

Le vecteur des sorties plates  $y$  et ses dérivés offrent la représentation dynamique du système, de sorte que les profils des sorties plates sont connues en fonction du temps. Alors, on pourra avoir les profils de tous les états du système et les entrées correspondantes. Cette propriété est utilisée pour estimer la trajectoire des sorties plates.

Pour réguler le bus dc de tension  $V_{\text{Bus}}$  (stabilisation du circuit intermédiaire) et la tension SC (état de charge), basé sur la théorie du contrôle de planéité introduite ci-dessus, les sorties plates  $y$ , les variables d'entrée de commande  $u$ , et les variables d'état  $x$  sont définies comme :

$$y = \begin{bmatrix} E_{\text{Bus}} \\ E_{\text{Tot}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} \quad (\text{III.20})$$

$$u = \begin{bmatrix} P_{\text{SCref}} \\ P_{\text{Tref}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} \quad (\text{III.21})$$

$$x = \begin{bmatrix} V_{\text{Bus}} \\ V_{\text{SC}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \quad (\text{III.22})$$

Où :  $P_{\text{Tref}}$  est la puissance totale du FC et du générateur PV.

Nous approuvons que l'énergie électrostatique du bus DC ( $E_{\text{Bus}}$ ) du système est constante et définie comme une sortie plate  $y_1$ . Par conséquent, nous pouvons déduire l'expression suivante

$$y_{\text{bus}} \dot{=} 0 = P_{\text{FC-r}} + P_{\text{PV-r}} + P_{\text{SC-r}} - P_{\text{charge}} \quad (\text{III.23})$$

Semblable, l'énergie électrostatique total  $E_{Tot}$  stockée dans la capacité du lien DC et dans le super condensateur est considéré comme constante et déterminée en tant que variable de sortie  $y_2$ , on peut écrire :

$$y_2' = 0 = P_{FC-r} + P_{PV-r} - P_{charge} \quad (III.24)$$

De (8) et (9), les variables d'état peuvent s'écrire

$$x = \begin{bmatrix} \sqrt{\frac{2 y_1}{C_{Bus}}} \\ \sqrt{\frac{2 (y_2 - y_1)}{C_{SC}}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varphi(y_1) \\ \varphi(y_1, y_2) \end{bmatrix} \quad (III.25)$$

De (11) à (16), les variables d'entrée de contrôle peuvent être calculées de la sortie plate et de ses dérivées temporelles comme suivant

$$u_1 = 2P_{SCLim} \cdot \left[ 1 - \sqrt{1 - \left( \frac{y_1 + I_{charge} \cdot \varphi(y_1) - P_{FC-r} - P_{PV-r}}{P_{SCLim}} \right)} \right] = \psi_1(y_1, \dot{y}_1) = P_{SCRef} \quad (III.26)$$

$$u_2 = 2P_{TotLim} \cdot \left[ 1 - \sqrt{1 - \left( \frac{\dot{y}_2 + \sqrt{\frac{2 y_1}{C_{Bus}}} \cdot I_{charge}}{P_{TotLim}} \right)} \right] = \psi_2(y_1, \dot{y}_2) = P_{Tref} \quad (III.27)$$

$$\text{Où : } P_{SCLim} = \frac{V_{SC}^2}{4 r_{SC}}, P_{TotLim} = \frac{V_{Tot}^2}{4 r_{Tot}} \quad (III.28)$$

$P_{SCLim}$  : est la puissance maximale limitée du convertisseur de SC.

$V_T$  : est la tension virtuelle des générateurs d'énergie FC et PV.

$r_T$  : Les pertes statiques virtuelles dans les convertisseurs de puissance des FC et PV.

$$\text{En réalité : } P_{TotLim} = P_{FCLim} + P_{PVLim} \quad (III.29)$$

Où :  $P_{FCLim}$  : est la puissance maximale du FC et  $P_{PVLim}$  : est la puissance PV maximale du PV.

Les variables de contrôle ( $u_1, u_2$ ) ont été utilisées pour corriger la trajectoire du système hybride proposé, et assurer que le système suit bien le chemin de référence.

Conformément aux équations des variables de contrôle ( $u_1, u_2$ ), le système peut être considéré comme un système plat.

### III.3.2. Loi de commande

Pour suivre la sortie plate  $y$  à sa référence  $y_{ref}$ , nous utilisons la loi de contrôle asymptotique de rétroaction suivante :

$$(y_{1REF} - \dot{y}_1) + K_1(y_{1REF} - y_1) + K_2 \int_0^t (y_{1REF} - y_1) d\tau = 0 \quad (III.30)$$

$$\dot{y}_1 = y_{1REF} + K_1(y_{1REF} - y_1) + K_2 \int_0^t (y_{1REF} - y_1) d\tau \quad (III.31)$$

$$\dot{y}_2 = y_{2REF} + K_{21}(y_{2REF} - y_2) \quad (III.32)$$

Où :  $K_1, K_{21} = 2 \xi w_n$  et :  $K_2 = w_n^2$ .

$\xi$  : est le rapport d'amortissement choisi et  $w_n$  : est la fréquence naturelle définie. Ces deux paramètres sont ajustés à la dynamique souhaitée. Où  $K$  est un paramètre de contrôle de correction.

Comme il est montré dans la (figure III.3) le schéma de commande se constitue de deux boucles de contrôles, chacune d'elle a pour but de contrôler une variable d'énergie, la première l'énergie du bus continu  $E_{Bus}$  qui représente la variable la plus importante et la deuxième est l'énergie totale (énergie de stockage du super condensateur + l'énergie du bus continu).

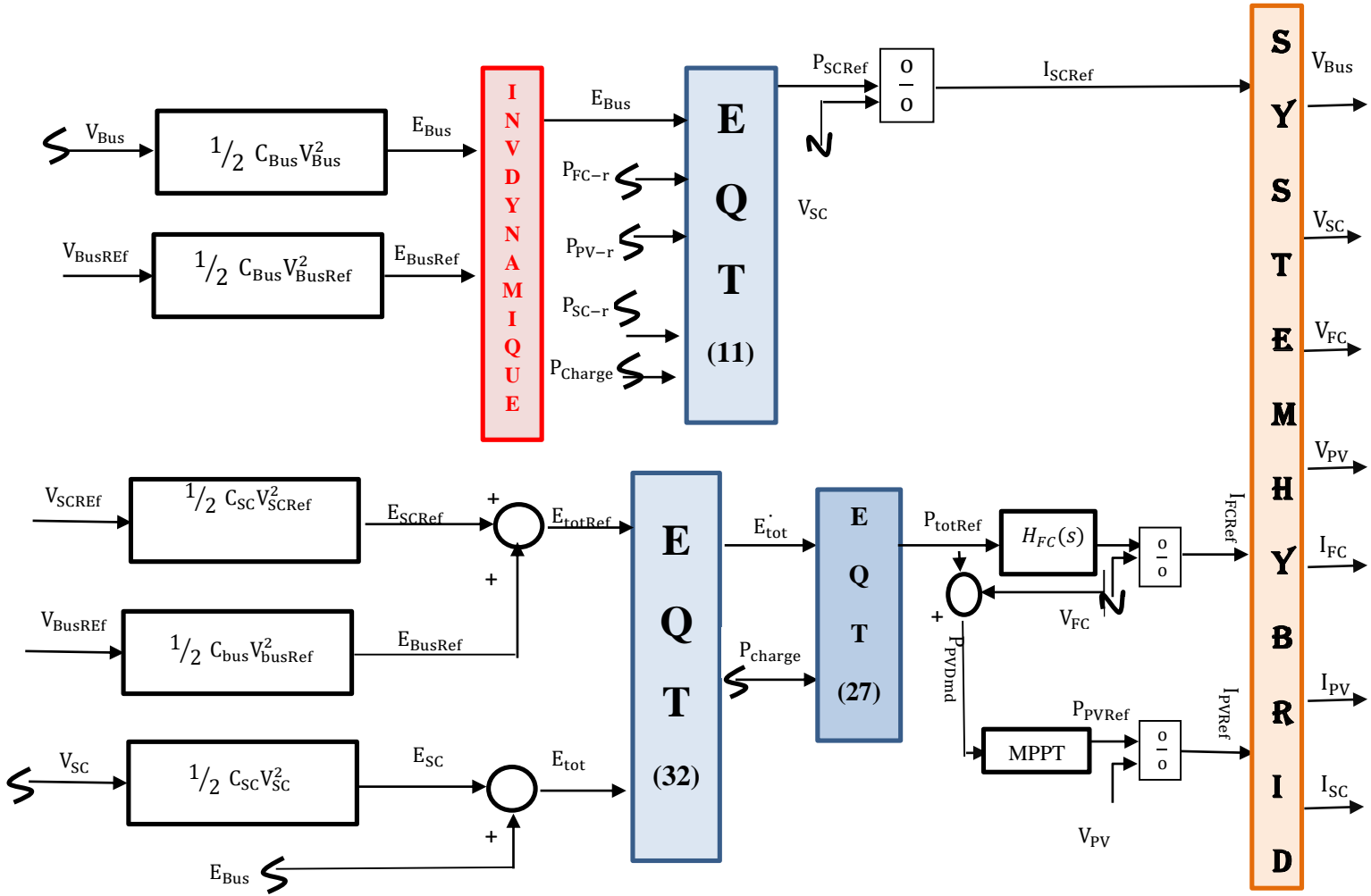


Figure III-3: schéma de contrôle du système hybride FC-PV et SC proposé.

La figure 3 illustre le plan de contrôle du système hybride FC-PV et SC proposée, en utilisant la loi de l'inverse dynamique. Ce dernier présente la loi de contrôle de l'énergie du bus continu qui génère le signal de référence pour les SC comme une puissance qui doit être délivré à partir du pack de stockage. Cette puissance est divisée par la tension mesurée du super condensateur en concevant un courant de référence du super condensateur  $I_{SCRef}$  mentionnée dans l'équation (10). La gestion énergétique de tout le système c'est-à-dire la loi de contrôle de l'énergie du système  $P_{TotRef}$  est montrée par l'équation (27) et (32). Par suite le contrôle du système génère la puissance de référence de la source principale FC. L'algorithme calcule la différence entre la

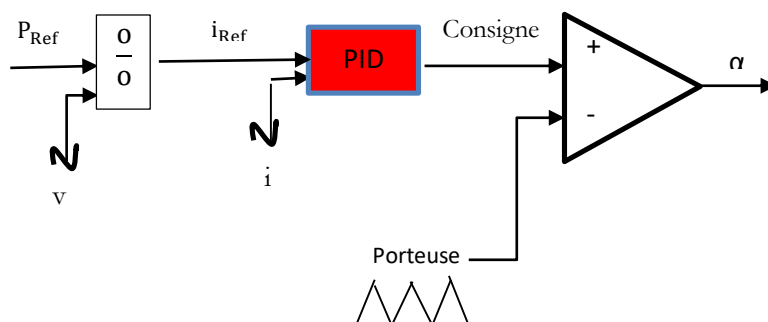
puissance totale de référence  $P_{TotRef}$  et la puissance de référence de la pile à combustible  $P_{FCRef}$  afin de générer un signal de commande de la source photovoltaïque  $P_{PVRef}$ . [48]. Le signal de référence pour cette dernière permettra de couvrir le manque de puissance et activera le mode économique.

Il s'avère très intéressant de mentionner que si la pile à combustible et les cellules solaires sont incapable de fournir la puissance nécessaire à la charge, le super condensateur fournira la différence (exclusivement en régime transitoire : mode freinage ou accélération).

### III.3.3. Régulateur du courant

Les figures 4 et 5 montrent la suite du schéma de commande du système hybride FC-PV et SC proposé. Après avoir obtenu les courants de références de toutes les sources. Ces derniers entrent dans des nouvelles boucles de régulation pour commander les différents convertisseurs associés à chaque source. Pour ces boucles on fait appel à la commande MLI et aux régulateurs PID et PD. Ces derniers ont été expliqués précédemment dans le chapitre I.

La première boucle est basée sur le régulateur PID pour la régulation du courant du bus continu, et la deuxième boucle est basée sur un régulateur PD pour réguler le courant total de sortie des sources FC et PV, selon les équations (III.31), (III.32)



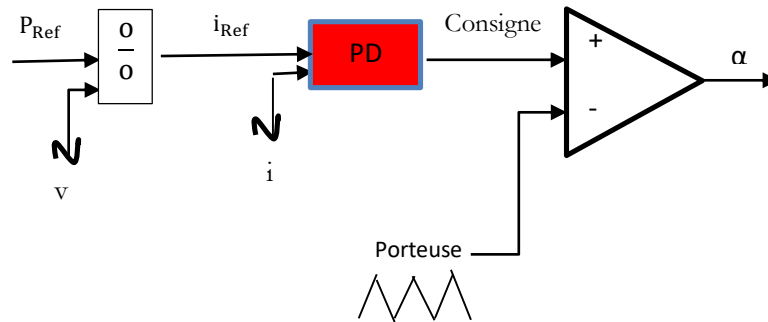


Figure III-5: Boucle de régulation du courant avec le régulateur PD

Pour la commande MLI (Modulation de largeur d'impulsion) consiste au découpage d'une pleine onde rectangulaire, La technique la plus répondu pour la formation d'un signal MLI est de comparer deux signaux en utilisant un amplificateur opérationnel. Le premier dit signal de référence (consigne) qui est un signal continu qui varie entre deux seuils définis. Le deuxième dit signal de la porteuse qui est un signal de très grande fréquence par rapport au signal de référence. L'instant de commutation des interrupteurs est défini par l'interaction des deux signaux de référence et de la porteuse [49].

### III.4. Résultats de simulation

#### III.4.1. Fonctionnement du système en mode normal

Dans le but de valider la stratégie de contrôle des sources du véhicule hybride proposé, la puissance maximale de la source primaire FC est ajustée à 500. Le contrôle du système hybride FC-PV et SC est assuré par la boucle fermée de l'énergie du bus continu par une loi asymptotique de rétroaction.

Les résultats de la gestion d'énergie du système peuvent être donnés par les figures suivantes :

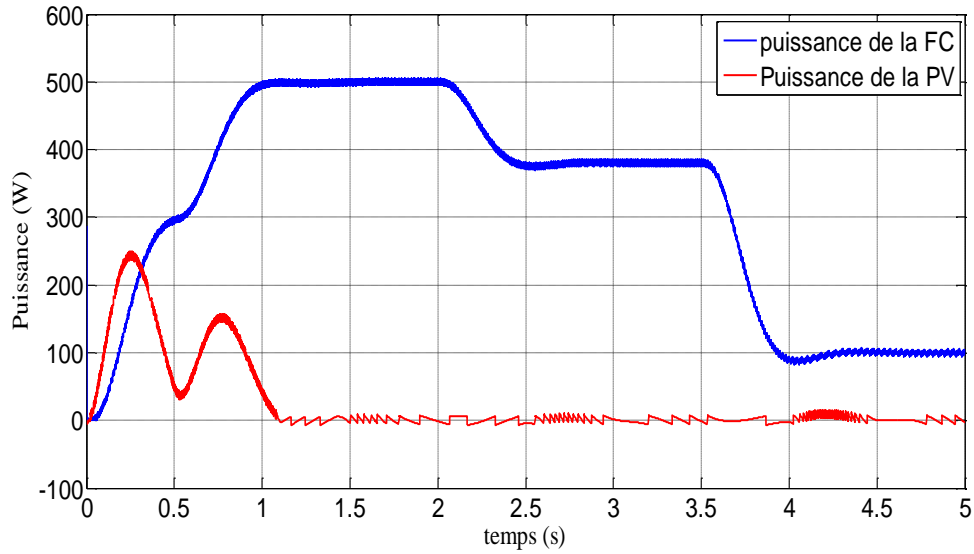


Figure III-6: La puissance produite par la pile à combustible et la source photovoltaïque.

La figure III.6 illustre une comparaison de puissance entre la source primaire qui présente une bonne réponse au niveau de la puissance produite. Serte elle suit les demandes de la charge mais il y'a un certain retard causé par la procédure chimique, d'une autre maniéré elle présente un fonctionnement dynamique lent lors de sa production de puissance et c'est au supercondensateur de compenser et d'ajuster son retard et répond efficacement en se déchargeant. Compte à la source secondaire, on constate que sa puissance moyenne est estimée à 0W.

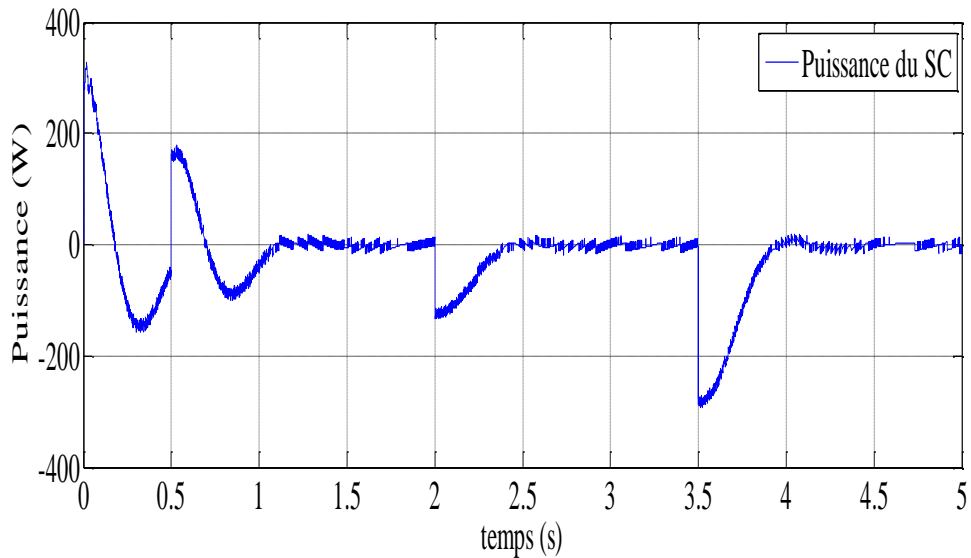


Figure III-7: la puissance produite à partir du supercondensateur.

L'état de charge du système de stockage est donné comme suite :

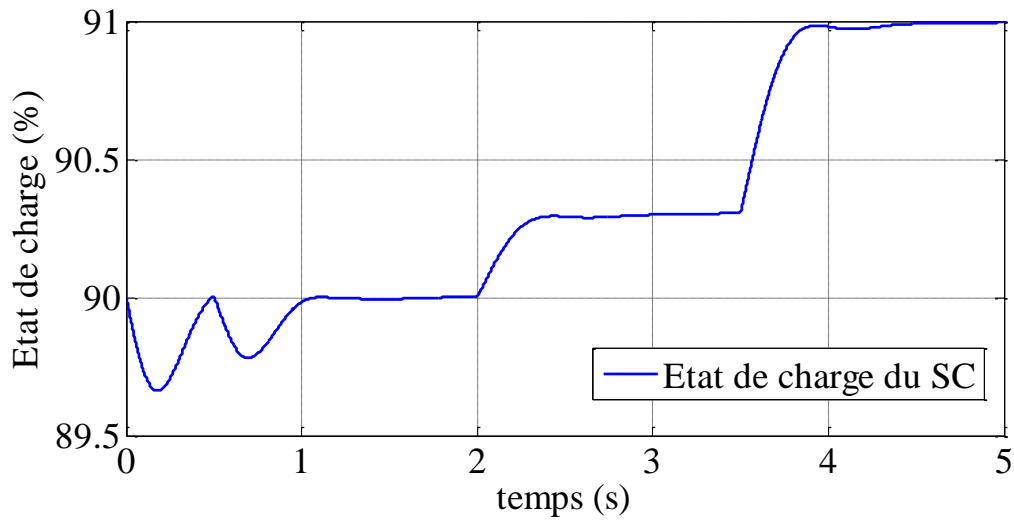


Figure III-8: Etat de charge du super condensateur.

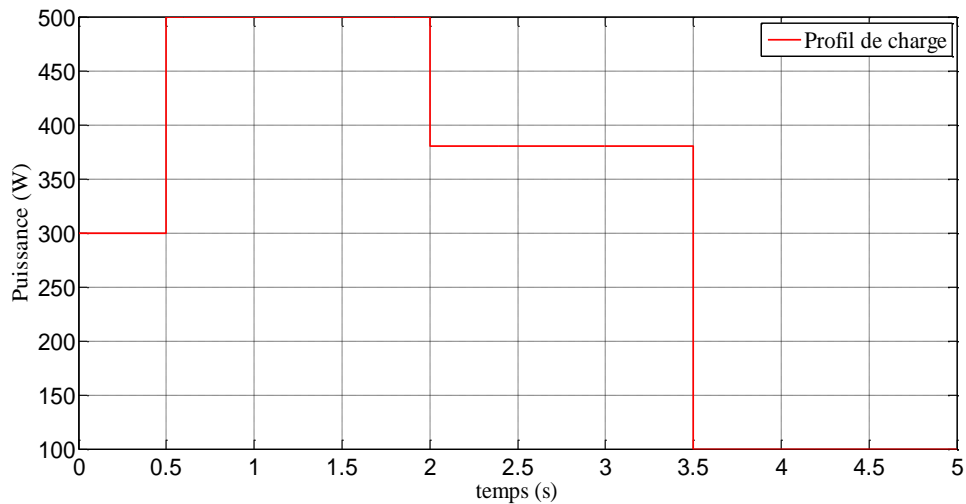


Figure III-9: le profil de la charge.

De 0 à 0.3 s, le supercondensateur commence à se décharger et fournit de l'énergie pour satisfaire la demande de la charge (demande par échelon positif), d'autre part le système FC, qui est la source primaire, commence à produire de l'énergie. La source PV, qui est la source secondaire, génère l'énergie nécessaire pour couvrir la puissance totale nécessaire pendant le fonctionnement du système hybride.

A 1.1 s, la puissance de la source photovoltaïque est réduite à zéro, ainsi la puissance produite par le super condensateur, et seule la source FC qui satisfait

l'énergie au système hybride. On note que le profil de charge choisi est un profil assez sévère car il présente plusieurs modes de fonctionnement (démarrage, freinage et accélération).

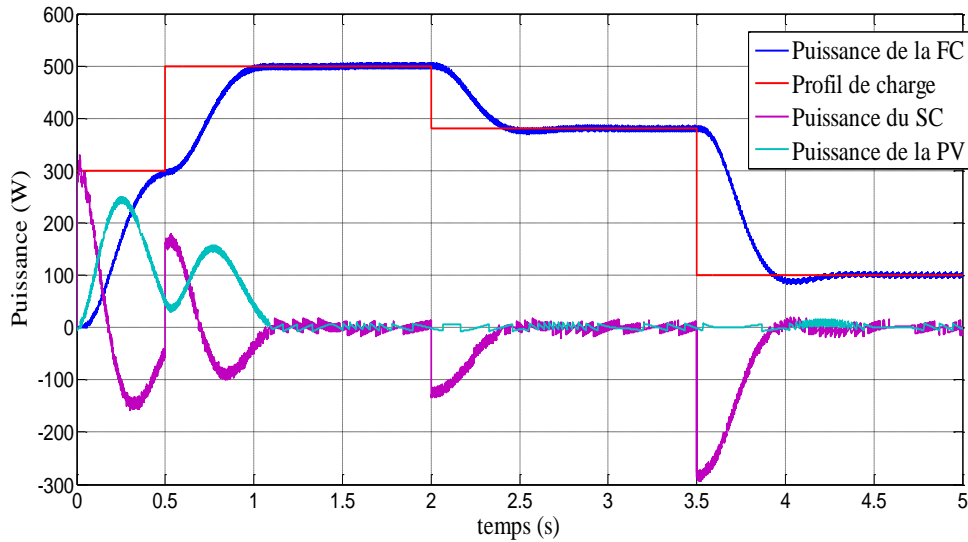


Figure III-10: Bilan des puissances du système.

La Figure III.10 illustre les modes de fonctionnement de base des sources FC-PV et SC étudiée. A l'état initial  $t = [0s ; 0.5s]$  la charge a une puissance de 300 W. La puissance du super condensateur est à son maximum afin de compenser le dynamique lent de la source primaire et couvrir la puissance demandé par la charge puis se décharge graduellement, la source primaire augmente au fur et a mesuré jusqu'à arriver à la valeur de la puissance demandé par la charge car elle passe de 0W a 500W et pour la puissance secondaire (PV) sa puissance augmente aussi de 0 à 250W et c'est dans ce laps de temps qu'elle atteint sa puissance maximale par rapport au reste de son fonctionnement

On mentionne que le dynamique lent du fonctionnement de la FC est compensé par le SC afin d'assurer le bon fonctionnement du système et cela prouve la gestion adéquate de l'énergie par le véhicule.

L'état second  $t = [0.5s, 2s]$ , la charge prend une valeur constante de 500W, la source primaire suit parfaitement les demandes de la charge, compte à la seconde source et à la source de stockage puissances moyennes sont estimées à 0W.

Ensuite  $t = [2s, 3.5s]$  un changement apparaît au niveau de l'allure de la charge (échelon négatif) en cette phase de fonctionnement la charge demande moins d'énergie (phase de freinage) et c'est la pile à combustible qui répond à cette baisse et lui fournit la puissance demandée. La source de stockage récupère un peu de sa puissance (voir l'état de charge) et la source secondaire (PV) à une puissance moyenne de 0W (mode économique désactivé).

L'état final de la charge prend une forte chute de puissance (à l'arrêt du véhicule) et sa puissance baisse à 100W. La source primaire baisse aussi à 100W et le super condensateur se décharge profondément jusqu'à -290W puis il reprend rapidement à la valeur de 0W. La source secondaire se stabilise à une puissance nulle  $P_{pv} = 0W$ .

IL s'avère intéressant de mentionner que à chaque instant du fonctionnement du véhicule la puissance de la charge demandé est assurée principalement par la pile à combustible. Cela prouve que la stratégie de contrôle d'énergie adapté au système est fonctionnelle et efficace.

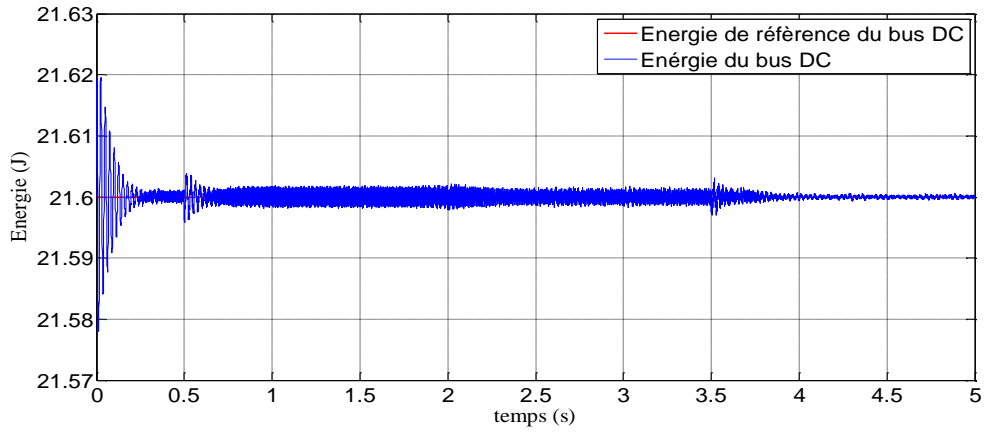


Figure III-11: L'énergie de référence du bus continu.

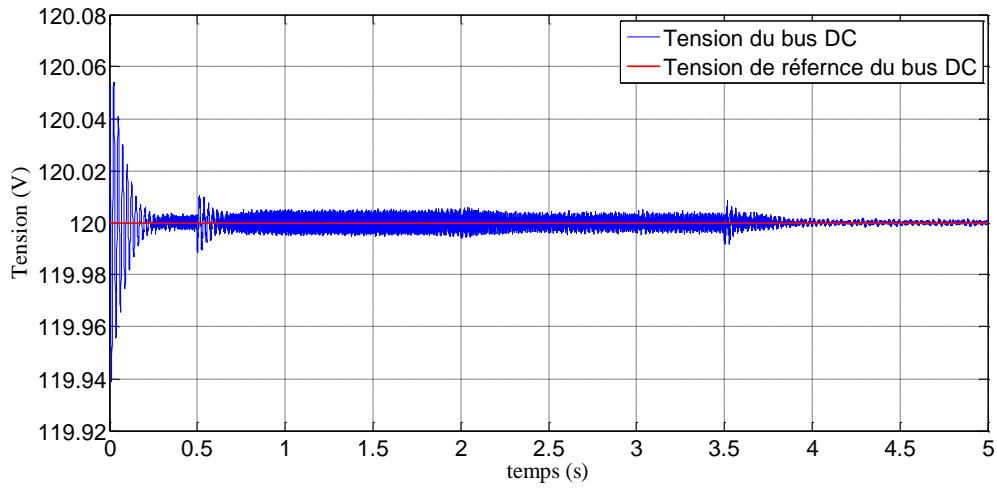


Figure III-12: La tension et la tension de référence du bus continu

La section prochaine présentera les courants des différentes sources ainsi leur tension

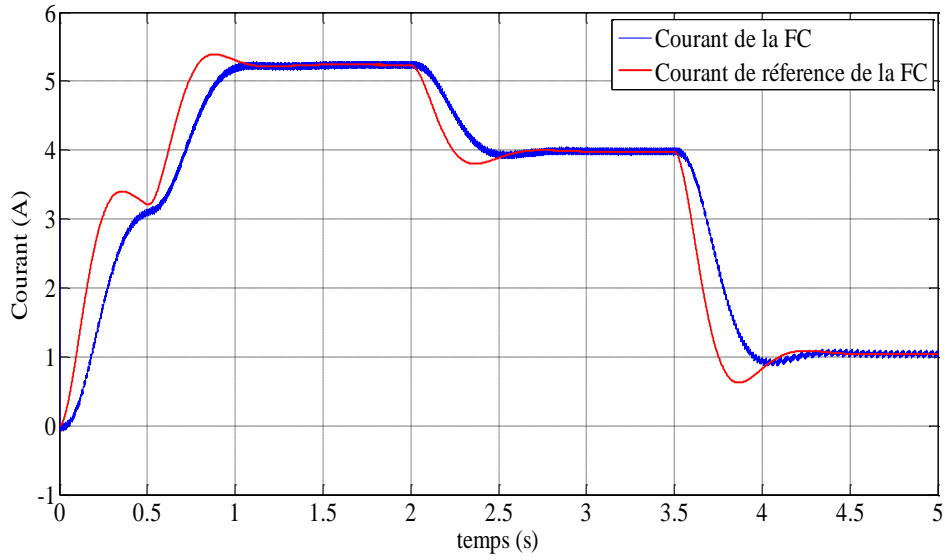


Figure III-13: Le courant de la pile à combustible et son référent.

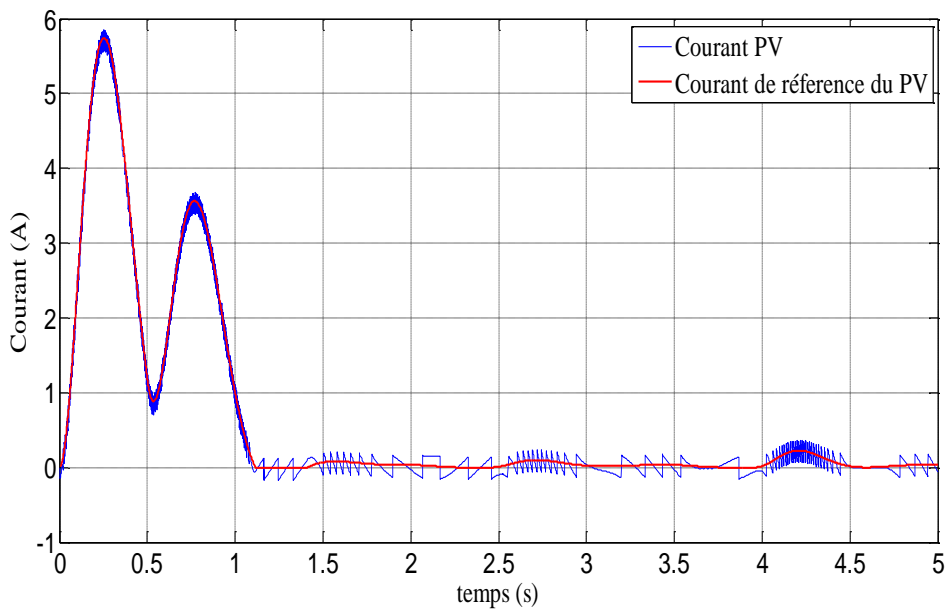


Figure III-14: le courant de la source photovoltaïque et son référent

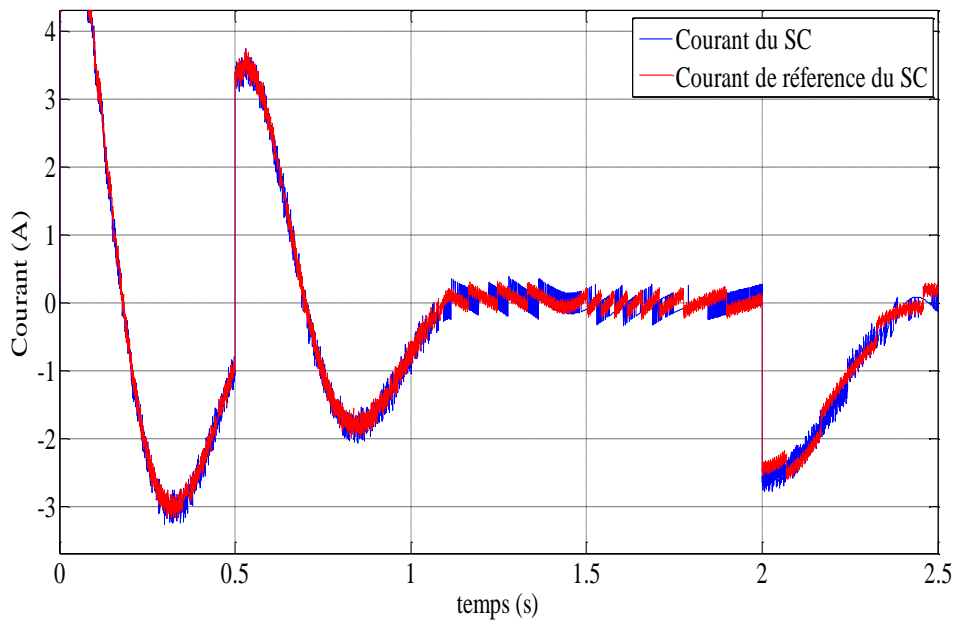


Figure III-15: Le courant du super condensateur et son référent

Selon les figures (III.14) et (III.15) les courants de la source photovoltaïque et du super condensateur suivent parfaitement leurs courants de références

Les tensions de la pile à combustible, la source photovoltaïque et du super condensateur sont représenté respectivement par les figures suivantes

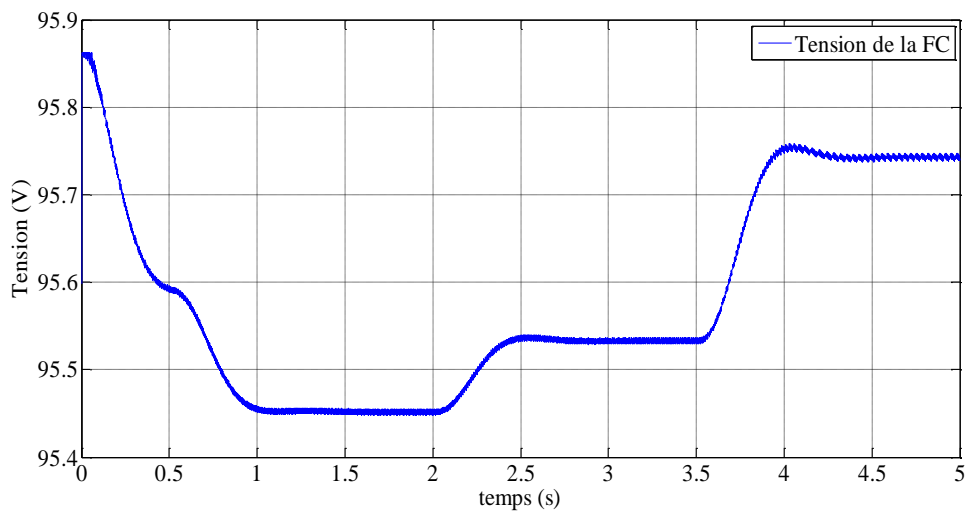


Figure III-16: La tension de la pile à combustible.

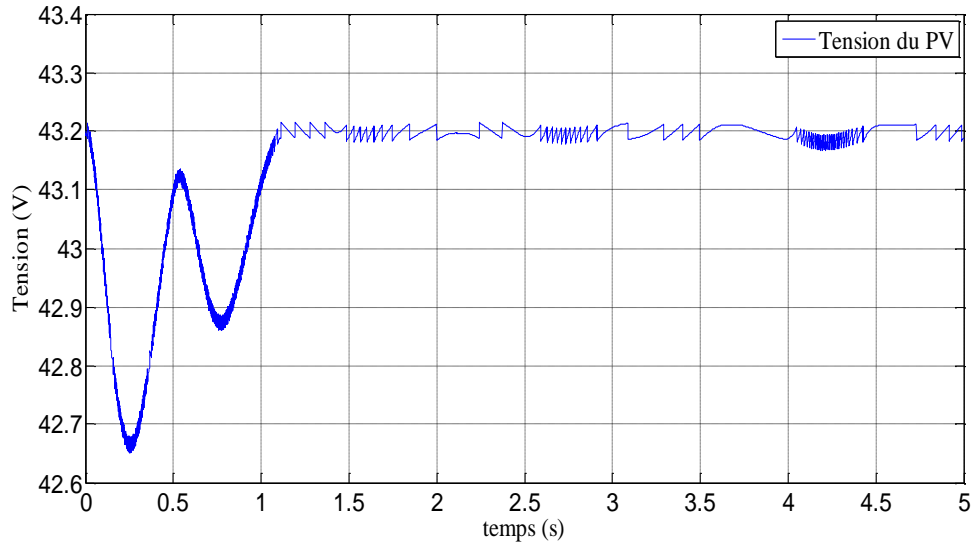


Figure III-17: La tension de la source photovoltaïque.

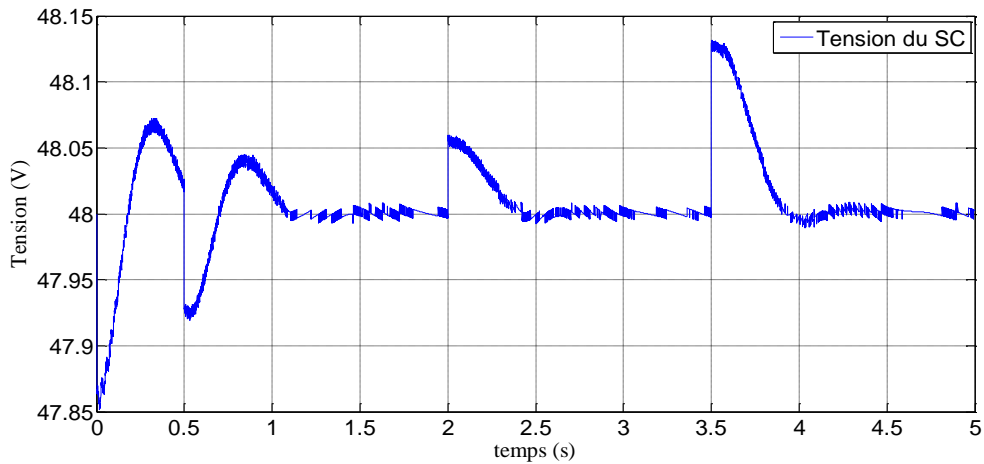


Figure III-18: La tension du super condensateur.

#### III.4.2. Fonctionnement du système en mode économique

Dans cette partie et en gardant le même profil de charge, on va limiter la puissance de la pile à combustible à 200 W, pour forcer le fonctionnement de la source PV, selon la puissance qui peut être fournie en fonction de l'éclairement disponible dans certain lieu (selon un profil d'éclairement). Le contrôle du système hybride FC-PV et SC est assuré par la boucle fermée de l'énergie du bus continu par une loi asymptotique de rétroaction.

Les résultats de la gestion d'énergie du système peuvent être donnés par les figures suivantes

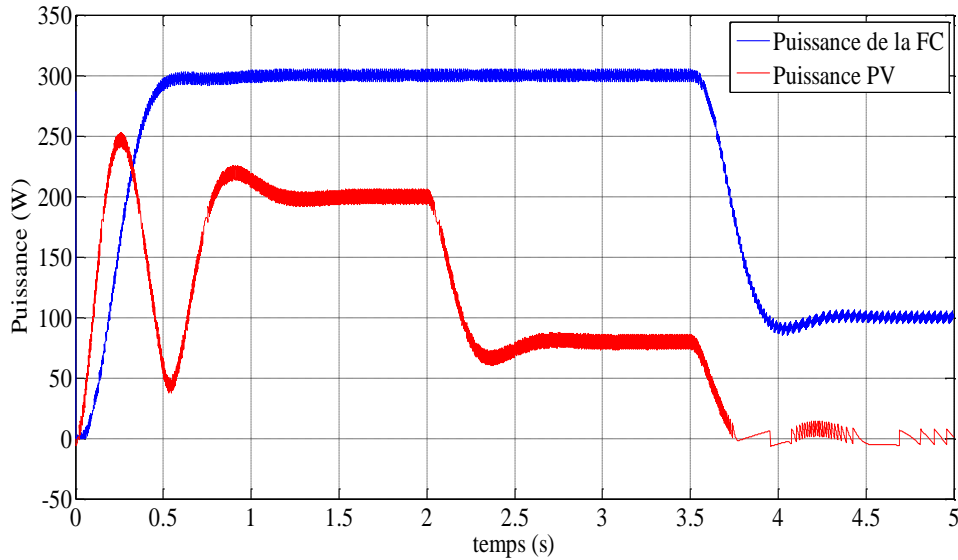


Figure III-19: La puissance produite par la pile à combustible et la source photovoltaïque en mode économique.

La figure III.19 illustre une comparaison de puissance entre la source primaire, qui est limitée à 300W pour forcer l'utilisation et le fonctionnement de la source secondaire PV. Cette dernière présente une réponse remarquable au niveau de la puissance produite en mode économique, et fournit une partie de la puissance transitoire nécessaire pendant la charge.

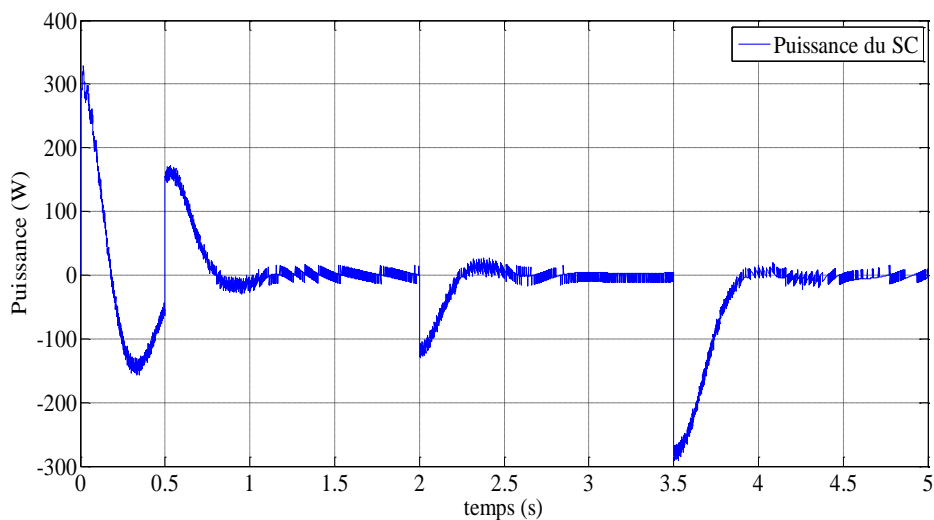


Figure III-20: La puissance produite à partir du super condensateur en mode économique.

L'état de charge du système de stockage est donné comme suit

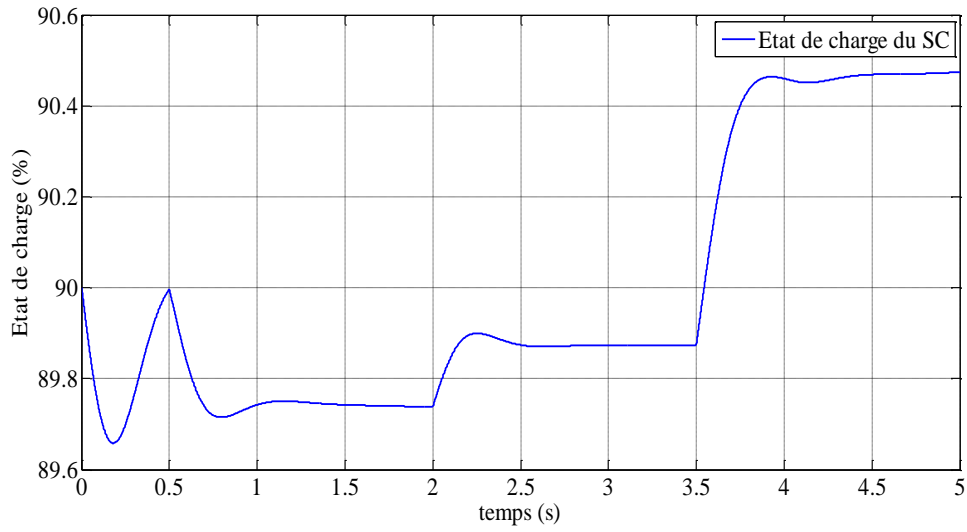


Figure III-21: Etat de charge du super condensateur en mode économique.

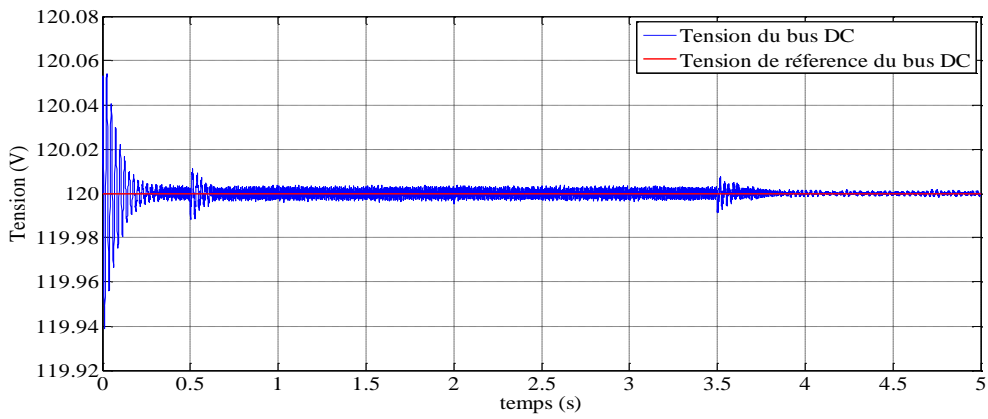


Figure III-22: La tension et sa référence du bus continu en mode économique.

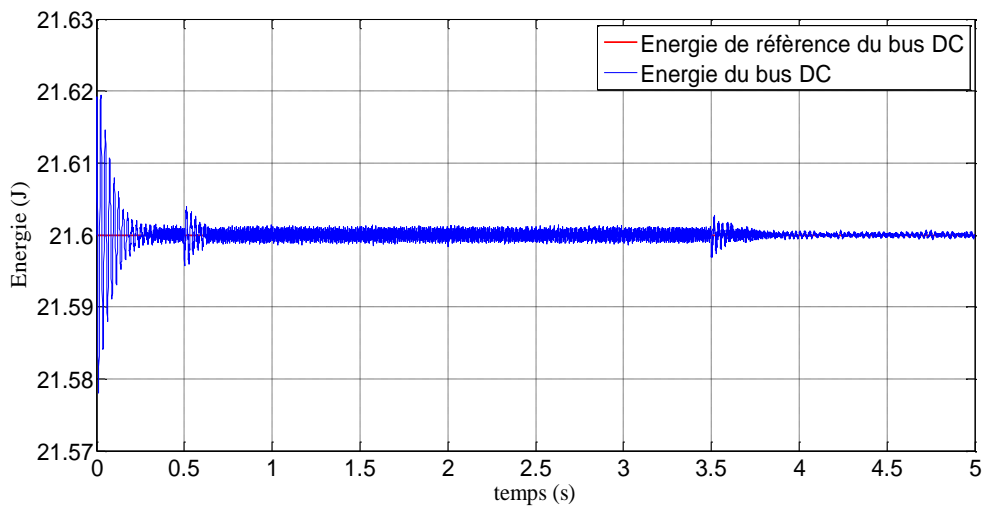


Figure III-23: Energie du bus continu en mode économique.

La section prochaine présentera les courants des différentes sources ainsi leurs tensions :

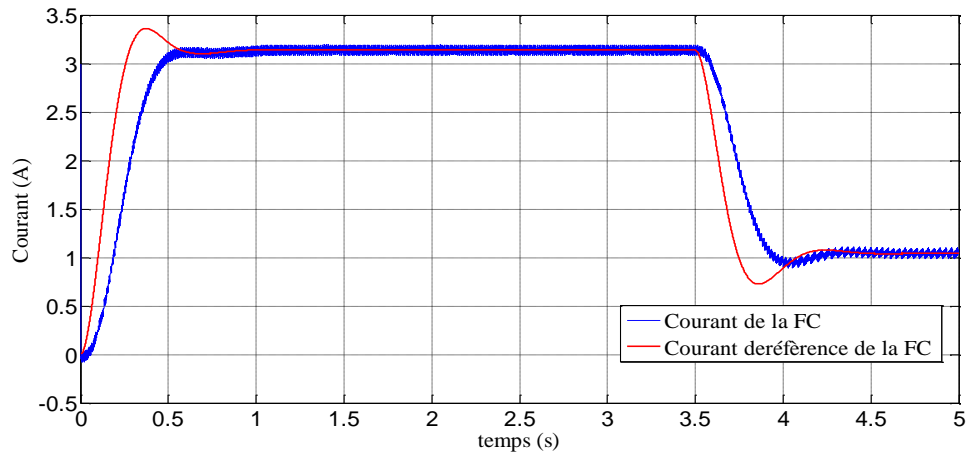


Figure III-24: Le courant de la pile à combustible et son référent en mode économique.

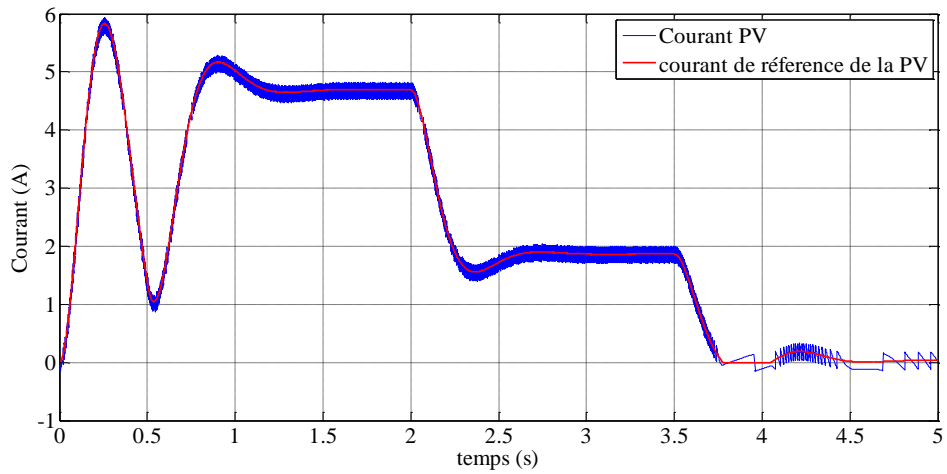


Figure III-25: le courant de la source photovoltaïque et son référent en mode économique.

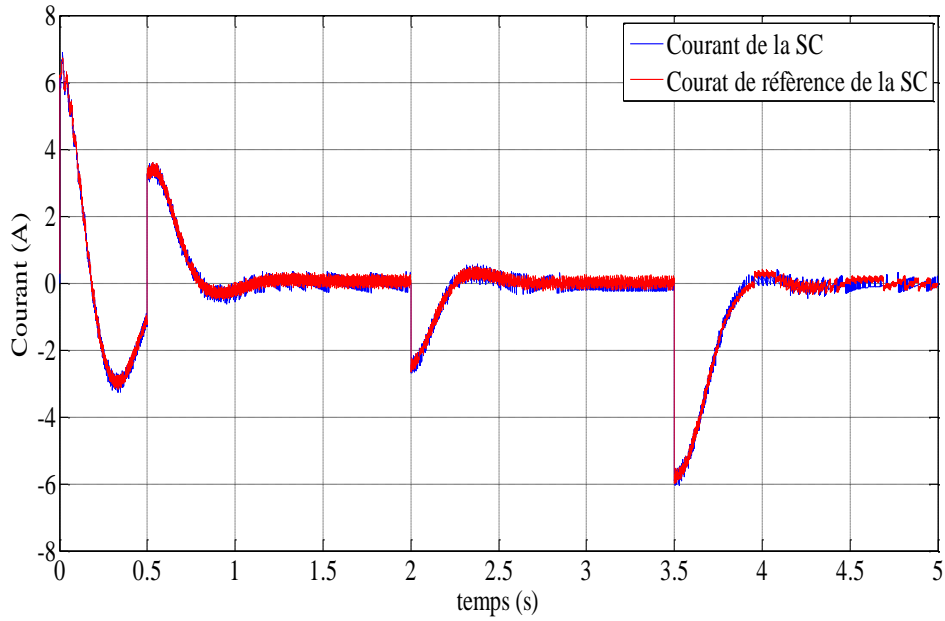


Figure III-26: le courant du supercondensateur et son référent en mode économique.

Selon les figures (III.25) et (III.26) les courants de la source photovoltaïque et du supercondensateur suivent parfaitement leurs courants de références.

Les tensions de la pile à combustible, la source photovoltaïque et du supercondensateur sont représenté respectivement dans les figures (III.27), (III.28) et (III.29) suivantes

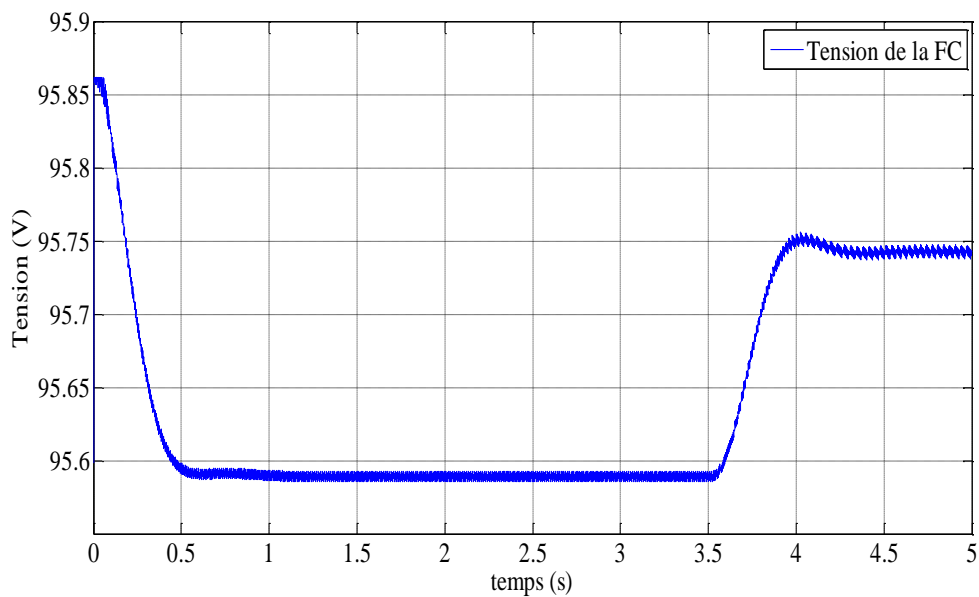


Figure III-27: La tension de la pile à combustible en mode économique

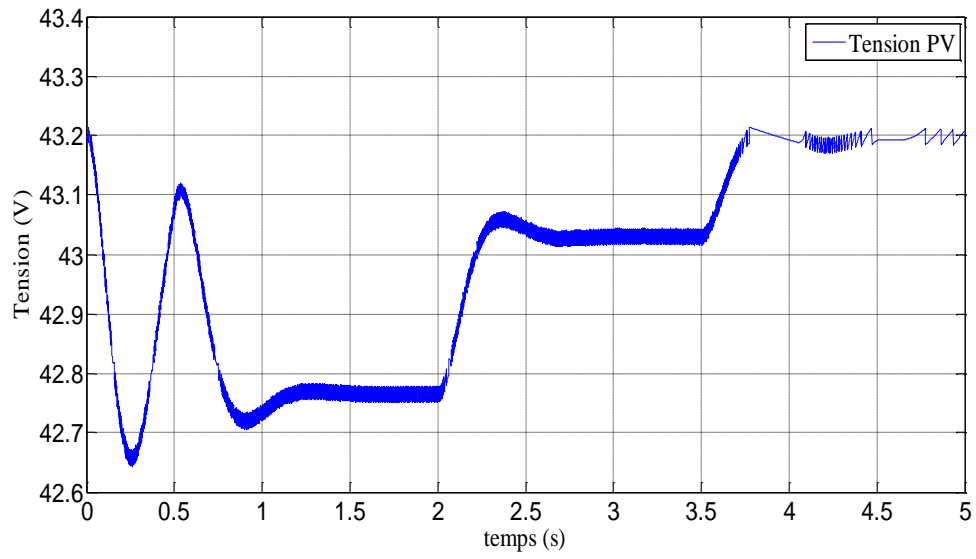


Figure III-28: La tension de la source photovoltaïque en mode économique.

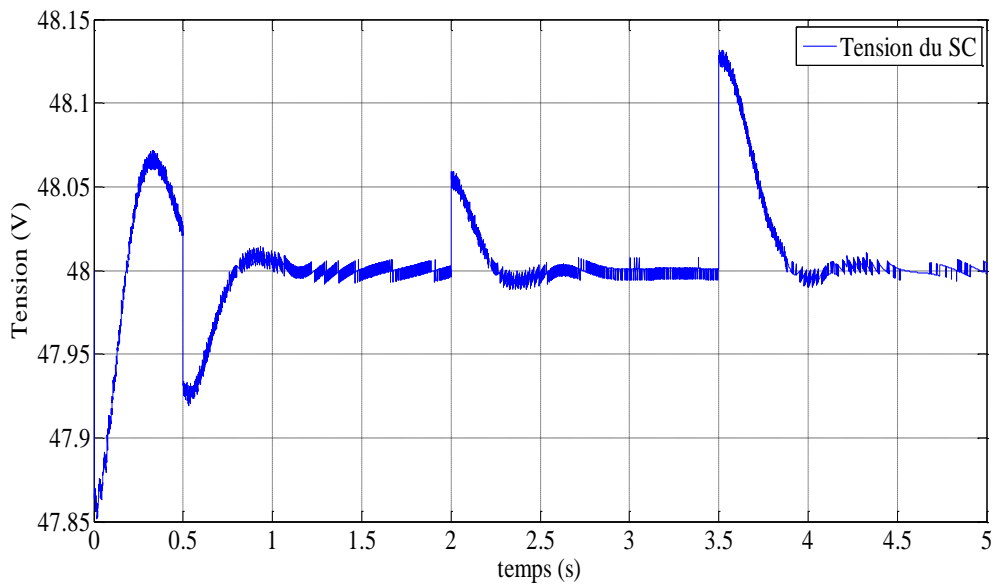


Figure III-29: Tension du supercondensateur en mode économique.

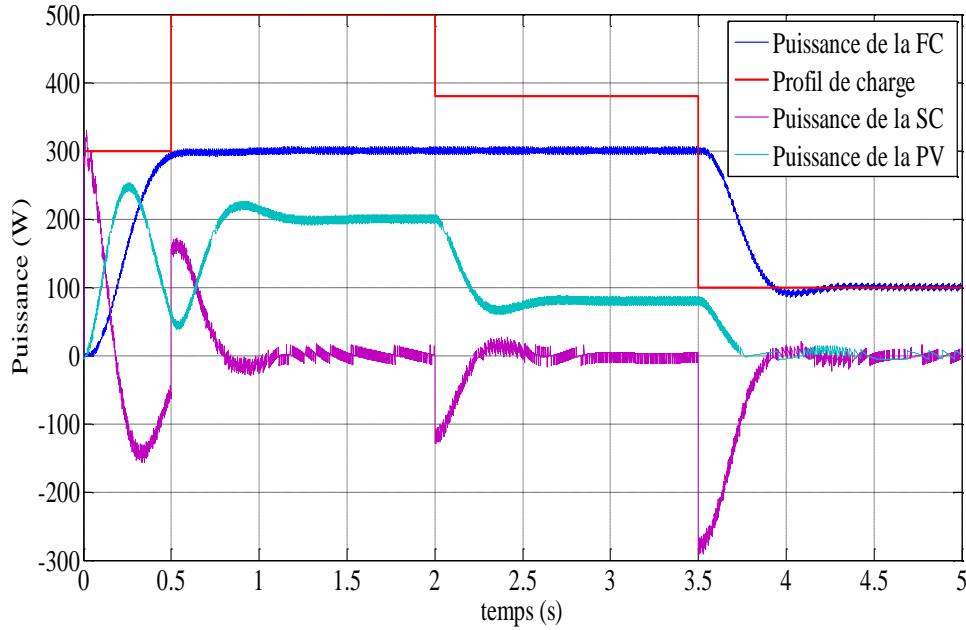


Figure III-30: Réponse des puissances du système en mode économique.

La Figure (III.30) montre les modes de fonctionnement de base en mode économique de la source hybride FC-PV-SC étudiée. L'état initial a une puissance de charge égale à 300 W, la puissance de la FC augmente de 0 à 300 W, et le périphérique de stockage SC est plein de charge. En conséquence, la source PV fournit une puissance maximale égale à 250W.

À  $t = 0.5s$ , la puissance de charge passe à une valeur constante de 500W (échelon positif qui simule l'accélération du moteur et augmentation de vitesse)), et la FC atteint sa puissance maximale limitée 300W. À cet instant la puissance du SC atteint une valeur de 180W en régime transitoire, et commence à se décharger jusqu'à 0 à  $t = 0.8s$ , et la puissance de la source photovoltaïque atteint sa valeur maximale 200W. Donc, la source PV, qui fournit la majeure partie de la puissance transitoire nécessaire pendant le fonctionnement du véhicule, car la puissance de charge en régime permanent (500 W) est supérieure à la puissance maximale limitée de la FC (300 W) ( qui simule l'activation d'un mode économique par le conducteur en présence des conditions climatiques convenables).

Par la suite, à  $t = 2s$ , la puissance de charge passe de 500W à 380W. La puissance de la source PV diminue jusqu'à 190W, et la puissance de la FC reste constante à 300W.

À  $t = 3.5s$  la puissance de charge passe à 100W. La puissance PV diminue jusqu'à zéro. Par conséquent, le SC est dans son état de charge jusqu'à 3.9s ou il est complètement chargé à travers la FC qui passe à 100W et à travers la source solaire, dans cette phase la charge est alimentée seulement par la source FC.

Cette partie montre l'importance de la source secondaire (PV) pour the 'scale range of the electric vehicle', qui est un déterminant majeur des coûts de recharge d'hydrogène, comme il détermine la taille, la durabilité et la durée de vie de supercondensateur, car un cycle profond de l'état de charge (SOC) du supercondensateur, affecte sa durée de vie. Par conséquent la source PV compense l'énergie de la FC, pour éviter la recharge continue d'hydrogène, qui affecte la durabilité du fonctionnement sur route.

### **III.5. Conclusion**

Dans ce chapitre, on a présenté et simulé une stratégie de contrôle de l'énergie d'un système hybride FC-PV-SC dans un véhicule électrique en utilisant un convertisseur DC / DC non isolé, basé sur le contrôle par platitude utilisant une loi de contrôle asymptotique de rétroaction linéaire. Les résultats des algorithmes proposés montrent que le contrôle par platitude utilisant un régulateur PI permet de réguler l'énergie du bus DC fournie pour diverses charges avec une erreur statique plus faible, ce qui offre plus de stabilité pour le système de génération. Le système prend en charge le contrôle du flux d'énergie à l'interface entre la pile à combustible, les cellules solaires, et le supercondensateur.

Cette technique augmente la fiabilité du système, contrôle le flux d'énergie et maintient la gestion de l'alimentation. De plus, dans cette analyse, une méthode de conception a été donnée. Où, la FC est la source principale, PV est la source secondaire, et les supercondensateurs servent comme dispositif de stockage pour compenser les incertitudes des sources de générateur FC et PV en régime permanent et en régime transitoire. Cette méthode ne nécessite pas de control d'algorithme de commutation, ni des intégrations des équations différentielles, ce qui est le principal avantage de gérer l'énergie dans les systèmes électriques hybrides de plusieurs ordres. Avec un contrôle par platitude utilisant la loi de rétroaction linéaire comme loi de commande, il est possible de faire fonctionner le supercondensateur en différentes étapes, en charge ou en décharge, et quelle que soit la variation du profil de charge, offrant plus de stabilité et de fiabilité au système en diminuant la perturbation dans le bus DC.

# CONCLUSION GÉNÉRALE

## **Conclusion générale**

Dans ce mémoire, nous avons présenté dans une première partie les différentes sources d'énergie et le dispositif de stockage utilisé pour la propulsion d'un véhicule hybride électrique en expliquant leur mode de fonctionnement et leur modélisation usuelle. Nous avons ensuite détaillé une stratégie de contrôle des convertisseurs statiques associés aux sources, basée sur le concept de platitude.

Donc ce travail est divisé en deux axes principaux :

-Modélisation et dimensionnement des deux sources d'alimentation (la pile à combustible comme source primaire et la source photovoltaïque comme source secondaire), de la source de stockage d'énergie (supercondensateurs), et des convertisseurs de puissances. La modélisation a permis de décrire et de simuler le comportement de chaque élément du système. Alors que l'étude de dimensionnement des différents éléments a permis de déterminer, selon un cahier des charges défini au chapitre II, les besoins énergétiques de notre véhicule électrique et la quantité d'énergie nécessaire pour le propulser, dont le dimensionnement des piles à combustible, des cellules photovoltaïques, et des supercondensateurs ont été discuté.

-Une stratégie de contrôle à deux boucles a été présentée. Elle possède l'avantage de parfaitement maîtriser le comportement des variables du système même en régime transitoire, et d'être peu sensible aux erreurs de modélisation. Ce mode de commande a donc été choisi pour contrôler les convertisseurs de la source hybride. L'architecture de commande de la source hybride consiste à s'assurer que les sorties du système (puissance, courant, et énergie électrostatique) suivent bien leur référence respective. Pour ce faire nous avons utilisé l'approche par platitude détaillée au chapitre III. Dans la stratégie de contrôle proposée, les contraintes associées au bon fonctionnement de la source hybride, comme par exemple les contraintes dynamiques

sur le courant délivré par la pile à combustible, sont prises en compte dans les phases de planification des trajectoires de référence des régulateurs.

Les résultats obtenus par simulation ont prouvé la pertinence du modèle proposé, et confirment l'efficacité de la stratégie de commande étudiée au chapitre III. Les stratégies de gestion d'énergie utilisées peuvent être appliqués à toute architecture de source hybride et à la plupart des topologies de convertisseurs d'interface

## Référence

1. DJELLOUL, H. and A. MOKRI, *Dimensionnement du moteur électrique d'un véhicule hybride parallèle*. 2019.
2. Guarnieri, M., *When cars went electric, part 2 [historical]*. IEEE Industrial Electronics Magazine, 2011. **5**(2): p. 46-53.
3. Ehsani, M., et al., *Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles*2018: CRC press.
4. WILLIAM, E.M.Y., *ENERGY REGENERATIVE BRAKING SYSTEM OF HYBRID ELECTRIC VEHICLE*, 2016, Beni-Suef University.
5. Mom, G., *The electric vehicle: Technology and expectations in the automobile age*2013: JHU Press.
6. Nouh, A., *Contribution au développement d'un simulateur pour les véhicules électriques routiers*, 2008, Besançon.
7. Morimoto, M., *Which is the First Electric Vehicle?* Electrical Engineering in Japan, 2015. **192**(2): p. 31-38.
8. Daanoune, A., *Contribution à l'Etude et à l'Optimisation d'une Machine Synchrone à Double Excitation pour Véhicules Hybrides*, 2012.
9. Lelong, J., D. Pilot, and R. Trigui. *Comportement et enjeux environnementaux des poids lourds de livraison urbaine à motorisation hybride électrique*. 2013.
10. Staff, D.E., *The Daily Egyptian*, December 06, 2006.
11. Larminie, J. and J. Lowry, *Electric vehicle technology explained*2012: John Wiley & Sons.
12. Fonseca, R., *Optimization of the sizing and the energy management for a hybrid fuel cell vehicle including fuel cell dynamics and durability constraints*, 2013, Lyon, INSA.
13. Flah, A., S. Lassaad, and C. Mahmoudi, *Overview of Electric Vehicle Concept and Power Management Strategies*, November 2014.
14. MOHAMMEDI, M., *Gestion de l'énergie pour une chaîne multi-sources*, 2016, Université Mohamed Khider-Biskra.
15. Souffran, G., *Dimensionnement de la chaîne de traction d'un véhicule électrique hybride basé sur une modélisation stochastique de ses profils de mission*, 2012.
16. Rousseau, G., *Véhicule hybride et commande optimale*, 2008.
17. Bernard, J., *Véhicules hybrides à pile à combustible: dimensionnement et stratégies de commande*, 2007.
18. Benlamine, R., *Etude et réalisation d'une machine électrique à forte densité de couple et fort rapport de sur-couple pour des applications de traction automobile*, 2015.
19. Benlamine, R., et al. *Nonlinear adaptive magnetic equivalent circuit of a radial-flux interior permanent-magnet machine using air-gap sliding-line technic*. in *2017 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*. 2017. IEEE.
20. Aymen, D. and K. Achref, *Commande floue des machines électriques*. 2019.
21. De Geest, E., *Méthodes d'optimisation pour le réglage de contrôleurs PID*, 2000, AU.
22. Lamy, C. and J.-M. Léger, *Les piles à combustible: application au véhicule électrique*. Le Journal de Physique IV, 1994. **4**(C1): p. C1-253-C1-281.

23. Schott, P., J.-P. Poirot, and P. Baurens. *Modélisation et simulation de la source d'énergie à pile à combustible du véhicule hydro-gén.* in *Annales de Chimie Science des Matériaux*. 2001. Elsevier.
24. Candusso, D., *Hybridation du groupe électrogène à pile à combustible pour l'alimentation d'un véhicule électrique*, 2002.
25. Zandi, M., *Contribution au pilotage des sources hybrides d'énergie électrique*, 2010, Institut National Polytechnique de Lorraine.
26. Simoncini, N., *Le développement des recherches sur les piles à combustible en France à la fin des années cinquante: analyse de la construction historique d'un engouement technologique*. Technologie et Innovation, 2019. **4**(4).
27. BOUCETTA, A., *Modélisation 2D d'une pile à combustible type PEMFC pour une application embarquée*, 2019, UNIVERSITE MOHAMED KHIDER BISKRA.
28. Curtin, D.E., et al., *Advanced materials for improved PEMFC performance and life*. Journal of power Sources, 2004. **131**(1-2): p. 41-48.
29. Thounthong, P., *Conception d'une source hybride utilisant une pile à combustible et des supercondensateurs*, 2005.
30. Radulescu, M.N., *Systèmes à cogénération d'électricité et de chaleur avec piles à combustible de type PEMFC ou SOFC et vaporeformage externe*, 2006.
31. Allali, N., *Convertisseur haut rendement à dimensionnement réduit pour batterie hybridée puissance/énergie de véhicule électrique: Principe de source de courant contrôlée*. 2020.
32. Saadi, R., *Convertisseurs Basse Tension (42V, 540V); Application Source Hybride Utilisant Une Pile à Combustible*, 2015, Université Mohamed Khider-Biskra.
33. Abdelhak, Y., *Modélisation d'une pile à combustible de type PEM*, 2017, UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF-M'SILA.
34. Amrouche, F., et al., *Modélisation d'une pile à combustible PEMFC alimentée directement en hydrogène-oxygène et validation expérimentale*. Revue des énergies renouvelables, 2005. **8**(2): p. 109-121.
35. Alcicek, G., *Contribution à l'étude du vieillissement et à l'intégration des supercondensateurs dans une chaîne de propulsion électrique haute tension pour des applications véhicule électrique*, 2014, Belfort-Montbéliard.
36. Payman, A., *Contribution à la gestion d'énergie dans les systèmes hybrides multi-sources multi-charges*, 2009, Institut National Polytechnique de Lorraine.
37. Dulout, J., et al. *Dimensionnement multi-objectif d'une association batterie–supercondensateur pour une application photovoltaïque*. 2016.
38. BERREKIBIA, M. and M. BENAOUADJ, *Gestion d'énergie dans une véhicule électrique hybride*.
39. Villalva, M.G., J.R. Gazoli, and E. Ruppert Filho. *Modeling and circuit-based simulation of photovoltaic arrays*. in *2009 Brazilian Power Electronics Conference*. 2009. IEEE.
40. Benmoussa, W., S. Amara, and A. Zerga, *Etude comparative des modèles de la caractéristique courant-tension d'une cellule solaire au silicium monocristallin*. Revue des Energies Renouvelables ICRES-07, Tlemcen, 2007(301-306).
41. Motahhir, S., A. El Ghzizal, and A. Derouich. *Modélisation et commande d'un panneau photovoltaïque dans l'environnement PSIM*. 2015.

42. Spirov, D., et al., *Modélisation des convertisseurs statique dc-dc pour des applications dans les énergies renouvelables en utilisant MATLAB/Simulink*. EF 2009, Compiègne, 2009.
43. Mkahl, R., *Contribution à la modélisation, au dimensionnement et à la gestion des flux énergétiques d'un système de recharge de véhicules électriques: étude de l'interconnexion avec le réseau électrique*, 2015, Belfort-Montbéliard.
44. Rizoug, N., *Modélisation électrique et énergétique des supercondensateurs et méthodes de caractérisation: Application au cyclage d'un module de supercondensateurs basse tension en grande puissance*, 2006.
45. Tegani, I., et al., *Differential Flatness Using the Predictive Neural Network Control Law for Hybrid Power System*. International Journal of Renewable Energy Research (IJRER), 2015. **5**(2): p. 635-647.
46. Thounthong, P., et al., *Intelligent model-based control of a standalone photovoltaic/fuel cell power plant with supercapacitor energy storage*. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2012. **4**(1): p. 240-249.
47. Yodwong, B., et al., *Differential Flatness-Based Cascade Energy/Current Control of Battery/Supercapacitor Hybrid Source for Modern e-Vehicle Applications*. Mathematics, 2020. **8**(5): p. 704.
48. Tegani, I., et al., *Experimental validation of differential flatness-based control applied to stand alone using photovoltaic/fuel cell/battery hybrid power sources*. International Journal of Hydrogen Energy, 2017. **42**(2): p. 1510-1517.
49. Ayad, A., *Etude et réalisation d'une commande MLI pilotant un hacheur série*, 2014.