



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de génie électrique

MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies
Électromécanique
Électromécanique

Réf. :

Présenté et soutenu par :
BOKHARI Yassine

Le : mercredi 10 juillet 2019

Un Système Hybride Pv - Pàc -Sc Pour Une Application Embarquée

Jury :

M.	MOHAMMEDI Messaoud	MCB	Université de biskra	Président
M.	CHENOUMI Halim	MAA	Université de biskra	Examineur
M.	ILYES TEGANI	MCB	Université de biskra	Rapporteur



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de génie électrique

MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies
Électromécanique
Électromécanique

Présenté et soutenu par :
BOKHARI Yassine

Le : mercredi 10 juillet 2019

Un Système Hybride Pv - Pàc - Sc Pour Une Application Embarquée

Présenté par :
BOKHARI Yassine

Avis favorable de l'encadreur :

Dr. ILYES TEGANI *signature*

Avis favorable du Président du Jury

M. MOHAMMEDI Messaoud *Signature*

Cachet et signature



Dédicace

*A mes chers parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur
tendresse, leur soutien et leurs prières,*

*A ma très chère femme, pour son soutien moral, appui et
encouragement,*

A mes chères sœurs et frères, pour leurs encouragements permanents,

A toute ma famille,



Remerciement



*P*ar ces quelques lignes, je tiens à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin au bon déroulement de cette mémoire de fin d'étude, en espérant n'avoir oublié personne...

*J*e tiens à remercier spécialement mon encadreur **Dr. ILYES TEGANI**, je vous remercie d'avoir cru en mes capacités, pour le temps et la patience que vous m'avez accordés tout au long de ce semestre en me fournissant d'excellentes conditions logistiques. Je garderai dans mon cœur votre générosité, votre compréhension et votre efficacité. Pour tout ce que vous m'avez donné, je vous remercie très sincèrement.

Résumé

Dans ce contexte, le travail présenté dans ce mémoire est une étude d'hybridation de trois sources énergétique (PàC,Cs,SC) pour alimenter un système embarquée (véhicule hybride),

Notre travail a été réparti en deux chapitres :

Dans le premier chapitre nous donnons une description générale et une notion sur les différentes sources constituant le système à étudier. Il est composé d'une pile à combustible, des cellules photovoltaïque et de super-condensateur.

Le deuxième chapitre est consacré à la modélisation du système à énergie hybride étudié. Il s'agit de représenter chaque constituant par son modèle mathématique, et la gestion d'énergie de ce système, il tient compte de tous les paramètres qui peuvent influencer la charge .L'étude a été faite en utilisant le logiciel Matlab/simulink, et les résultats obtenus sont présentés et discutés.

Sommaire

Dédicace	
Remerciements	
Sommaire	
Liste des abréviations	
Liste des figures	
Introduction général.....	01
Chapitre I: Les Ressources Energétiques PàC,SC,PV.....	03
I.1.1 la pile à combustible	03
I.1.2 les différents type la pile à combustible	03
I.1.3 principe de fonctionnement	04
I.1.4 Architecture d'une PàC	05
I.1.5 les conditions de fonctionnement de Système.....	06
I.1.6 Caractéristique électrique de la PàC	07
I.1.7 PàC dans l'industrie automobile.....	08
I.2.1 Supercondensateurs à double couche électrique (SCs)	10
I.2.2 Positionnement par rapport aux batteries.....	11
I.2.3 Fabricants de supercondensateurs actuels	13
I.2.4 Avantages et inconvénient des supercondensateurs.....	14
I.3.1 La cellule photovoltaïque.....	15
I.3.2 Type de cellules photovoltaïques.....	15
1) Les cellules au silicium monocristallines	15
2) Les cellules au silicium poly-cristallines.....	16
3) Les cellules au silicium amorphe.....	16
I.3.3 Les caractéristiques électriques des cellules et modules.....	17
I.3.4 Raccordement des cellules entre elles	18
I.3.5 Les avantages et les inconvénients de l'énergie solaire PV.....	19
I. 3.6 Les cellules PV dans l'industrie automobile.....	20
Conclusion.....	20
Chapitre II : Modalisation et simulation system hybride.....	21
Introduction.....	21
II.1 Modélisation de la source hybride	21

II.1.1	Caractéristique électrique de la pile à combustible.....	21
a)	Polarisation d'activation.....	22
b)	Polarisation ohmique.....	22
c)	Polarisation de concentration	22
II.1.2	Caractéristique électrique super-condensateur	24
II.1.3	Modèle de la cellule photovoltaïque	25
Modèle	mathématique Cs.....	25
II.1.4	Dimensionnement de la pile à combustible	27
II.1.5	Dimensionnement des cellules photovoltaïque	28
II.1.6	Dimensionnement des super condensateurs	30
II.2	Les hacheurs.....	31
II.2.1	Convertisseur Boost (élevateur de tension).....	31
II.2.1	Convertisseur buck-Boost.....	33
II.2.3	Architecture du système hybride.....	35
II.2.4	Modèle mathématique du système hybride	36
II. 3	Gestion de l'énergie.....	37
II. 3.1	Définition d'un système plat	37
II. 3.2	Contrôle de l'énergie des bus.....	38
II. 3.3	les modes de gestion d'énergie	40
II. 3.3	résultat de la simulation et interprétations	41
	Conclusion general.....	47
	Bibliographie.....	48

Liste des abréviations

PàC	Pille à combustible
Cs	Cellules solaire
Sc	Super-condensateur
H_2	L'Hydrogene
O_2	L'Oxygène
CO_2	Le dioxyde de Carbone
PEMFC	Pile à combustible à membrane échangeuse de protons
SPAC	System pile à combustible
I_{cc}	le courant de court circuit
E_{Nernst}	Constant de Nernst
V_{act}	Polarisation d'activation
V_{ohm}	Polarisation ohmique
V_{conc}	Polarisation de concentration
Esref,	représentent l'éclairement
Tjref	température sous conditions
Tj	température de jonction
Isat	courant inverse de saturation de la diode
K	constante de Boltzmann
n	le facteur de non idéalité de la photopile
DC	Courant continue
Y_{bus}	l'énergie électrostatique
Y_{busref}	l'énergie électrostatique référence
i_{SC}	le courant des super-condensateurs
i_{pv}	le courant des cellules solaire
i_{fc}	le courant des pile à combustible
P_{PV}	Puissance cellules solaire
P_{fc}	Puissance pile à combustible
P_{cs}	Puissance super-condensateurs

r_{FC}	la résistance série totale équivalente dans le convertisseur de pile à combustible
r_{pv}	le total résistance en série équivalente dans le convertisseur de cellules solaires
r_{sc}	le résistance en série équivalente totale dans le convertisseur de super-condensateur
ζ	Coefficient d'amortissement
ω_n	Coefficient de pulsation
P_{ch}	Puissance de charge

Liste des figures

Figure I.1 : Production de l'électricité dans une pile à combustible	04
Figure I.2 : Vue structurelle d'une cellule PàC	05
Figure I.3 : Rendements caractéristiques de la PAC et du Système PAC	07
Figure I.4 : Courbe de polarisation classique d'une cellule de PàC	08
Figure I.5 : Toyota FCV-R	08
Figure I.6 : STACK PàC 100 kW développée par Intelligent Energy 2015	08
Figure I.7 : développement des véhicules à PAC [07]	09
Figure I.8 : Schéma d'un supercondensateur	10
Figure I.9 : Charbon actif (50 μ m)	10
Figure I.10 : diagramme comparatif de puissance	11
Figure I.10 : différent gamme de produit maxwell	14
Figure I.10 : Principe de la conversion photovoltaïque	15
Figure I.11 : cellules monocristallin, poly-cristalline (milieu) et poly-cristallin (droite)	16
Figure I.12 : cellule photovoltaïque	17
Figure I.13 : la courbe courant-tension (I-V)	17
Figure I.14 : caractéristique des cellules en parallèle	18
Figure I.15 : caractéristique des cellules en série	18
Figure I.17 : Chargement de SC	20
Figure I.18 : Réduire la consommation	20
Figure II.1 : schéma équivalent d'une PEMFC	21
Figure II.2 : model de la PEMFC+Boost	23
Figure II.3 : Schémas électriques équivalents d'un super-condensateur	29
Figure II.4: model SC+ Buck-Boost	25
Figure II.5: Schéma électrique équivalent du modèle à une diode	25
Figure II.6: caractéristiques I _{pv} et PP _v dans les conditions standards	27
Figure II.7: model de cellules photovoltaïques choisies	29
Figure II.8: Caractéristiques du super condensateur choisi	30

Figure II.9: Architecture d'un convertisseur Boost idéal	31
Figure II.10: convertisseur Boost S bloqué	31
Figure II.11: convertisseur Boost S ouvert	32
Figure II.12 : Formes d'ondes courant/tension dans un convertisseur Boost	32
Figure II.13: Architecture d'un convertisseur Buck-boost idéal	33
Figure II.14: convertisseur buck-boost S bloqué	33
Figure II.15 convertisseurs buck-boost S ouvert	33
Figure II.16: Formes d'ondes courant/tension dans un convertisseur Buck-Boost	34
Figure II.17: Architecture du système hybride	35
Figure II.18: distribution d'énergie entre les sources d'énergie	37
Figure II.19: Schéma de commande de système hybride	40
Figure II.20: le bilan énergétique de tout le système hybride	41
Figure II.21: l'énergie de bus continu de système hybride	42
Figure II.22: tension de bus continu de système hybride	42
Figure II.23 : Tension de la pile à combustible	43
Figure II.24: Tension du super-condensateur	43
Figure II.25: Tension Des cellules solaire	44

I- introduction général :

Les énergies renouvelables sont un ensemble des sources naturelles telles que le soleil, du vent, de la chaleur de la terre ou bien extraire d'une source naturel comme l'hydrogène qui peut produire à partir de reformage du gaz naturel (conversion de molécules à l'aide de réactions chimiques par de la vapeur d'eau surchauffée) avec un rendement d'environ 80 % et peut aussi à partir l'électrolysations de l'eau. Les énergies renouvelables offrent des nombreux avantages, tel que inépuisables, gratuites et sont compatibles avec certain respect environnemental. Cependant une des propriétés qui limite son utilisation, est due leurs capacité de remplacé de suivi les fluctuations de la charge demandé et leurs faible autonomie, la solution à retenir est l'assemblage de plusieurs sources d'énergie, afin de constituer les systèmes d'énergies hybrides.

Le secteur des transports routiers est un des plus consommateur d'énergie et pollueur en termes d'émissions de gaz à effets de serre. Cette prise de conscience collective a entraîné des règlementations toujours plus strictes sur les émissions polluantes et la consommation des véhicules, qui sont ainsi devenues deux critères primordiaux pour la conception de nouveaux véhicules dit les véhicules tout électriques. Ces derniers ont été présentés comme une solution prometteuse, grâce à leur indépendance vis-à-vis du pétrole. Mais leur faible autonomie ne leur permet pas aujourd'hui de remplacer définitivement les véhicules conventionnels ; d'ou le développement d'un autre concept : les véhicules électriques hybrides

Les véhicules électriques hybrides face au problème de poids et de cout sont très considérables, à cause de sa motorisation thermique, et aussi la réservation de carburant (hydrogène) pour augmenter l'autonomie, qui pénalise l'espace disponible, et aussi leurs besoins ponctuels de puissance, l'association d'une source d'énergie (pile à combustible, cellules photovoltaïques, etc.) avec une source de puissance (super-condensateurs) Permet de bénéficier de l'apport de chacune en les sollicitant suivant leurs caractéristiques et le profil de mission à satisfaire.

Notre travail comporte deux chapitres :

Dans le premier chapitre, nous avons donné dans un premier lieu une brève présentation des éléments de notre système hybride étudié, qui comprend des cellules photovoltaïque (PV) et une pile à combustible (PEMFC), associés à l'ensemble un super-condensateur. L'ensemble de ces sources sera orné par une gestion de puissance permettant une meilleure exploitation du système dédié à la traction électrique, donc nous avons commencé par une brève généralité sur les sources,

l'énoncé de leur principe de fonctionnement, champs d'application et leurs avantages et inconvénients.

Le second chapitre est consacré quant à lui, à la modélisation statique des différents éléments qui composent notre système notamment la pile à combustible, cellules photovoltaïque avec une commande MPPT, le super-condensateur, ainsi que les éléments d'électroniques de puissance convertisseur DC/DC Boost et Buck-Boost utilisés pour ce système, puis une stratégie de commande qui se base sur la notion de platitude, et en dernier est dédié à la présentation et interprétation des résultats de simulation de ce système.

Enfin, notre travail est clôturé par une conclusion générale

CHAPITRE I
LES SOURCES DE SYSTÈME HYBRIDE

I- Les Ressources Energétiques De Notre Système Hybride :

I.1.1 la pile à combustible :

Une pile à combustible (PàC) permet de convertir directement de l'énergie chimique de combustion (oxydo-réduction) en énergie électrique, en chaleur et en eau, qui associée de l'hydrogène (H_2) et de l'oxygène (O_2) pour former des molécules d'eau (H_2O), tout en dégageant de l'énergie électrique et thermique. Ce procédé n'émet ni gaz à effet de serre (CO_2) ni particules fines, et ne rejette que de l'eau .

I.1.2 les différents type la pile à combustible :

Les PàC sont classées selon le choix de l'électrolyte et du combustible utilisé. Le choix de ces deux éléments détermine les réactions aux électrodes et le type d'ions qui traversent l'électrolyte et conditionne la température de fonctionnement de la pile.

	nom	Electrolyte	Plage de puissance	Température de fonctionnement	Domain d'application
PAC à Basses Températures	DMFC (Direct Methanol Fuel Cell)	Membrane polymère	1Mw à 100kW	60-90 °C	portable
	Pemfc (Proton Exchange Membrane Fuel Cell)	Membrane polymère	100w à 500kW	60-90 °C	Transport portable stationnaire
	Afc (Alcaline Fuel Cell)	Solution alcaline aqueuse	10Kw à 100kW	50-250 °C	Transport spatiale
	PAFC (Phosphoric Acid Fuel Cell)	Acide phosphorique	Jusqu'à 10MW	160-220 °C	stationnaire
PAC à Hautes Températures	Mcfc (Molten Carbonate Fuel Cell)	Carbonate fondu	Jusqu'à 100MW	650 °C	stationnaire
	Sofc (Solid Oxide Fuel Cell)	Oxyde solide	Jusqu'à 100MW	750-1050 °C	stationnaire

Tab I.1 : Différents types de piles à combustible [01].

Chaque type de PàC a un domaine d'application privilégié. Parmi les divers types de pile, c'est la pile PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell) qui se développe le plus vite. Elle se présente comme le choix le plus adéquat pour des applications dans le domaine du transport et ceci pour trois raisons essentielles [02] :

1) **Température de fonctionnement** : la pile fonctionne à basse température, entre 60°C et 90°C, ce qui est adapté à un usage automobile. A haute température, la dégradation des matériaux est assez élevée.

2) **Structure solide** : sa membrane en polymère solide garantit une certaine résistance mécanique vis à vis des contraintes liées à l'environnement automobile ; elle empêche notamment les fuites dues aux vibrations.

3) **Densité de puissance** : la propulsion d'un véhicule requiert une puissance de quelques kilowatts à une centaine de kilowatts. En outre, le groupe motopropulseur doit avoir une masse et un encombrement acceptable. La PàC de type PEMFC répond le mieux à ces contraintes avec une densité de puissance comprise entre 1kg/kW et 3kg/kW.

I.1.3 principe de fonctionnement :

Dans une PàC de type PEMFC, la fabrication de l'électricité se fait grâce à l'oxydation sur l'électrode négative d'un réducteur, couplée à la réduction sur l'autre électrode d'un oxydant. Elle possède une cathode et une anode séparées par un électrolyte qui assure entre autres le passage du courant par transfert ionique des charges. Comme une pile classique, la pile à combustible consomme son oxydant, l'oxygène (O_2) et son réducteur, l'hydrogène (H_2) et continue de fonctionner tant qu'elle est approvisionnée en hydrogène et en oxygène[3].

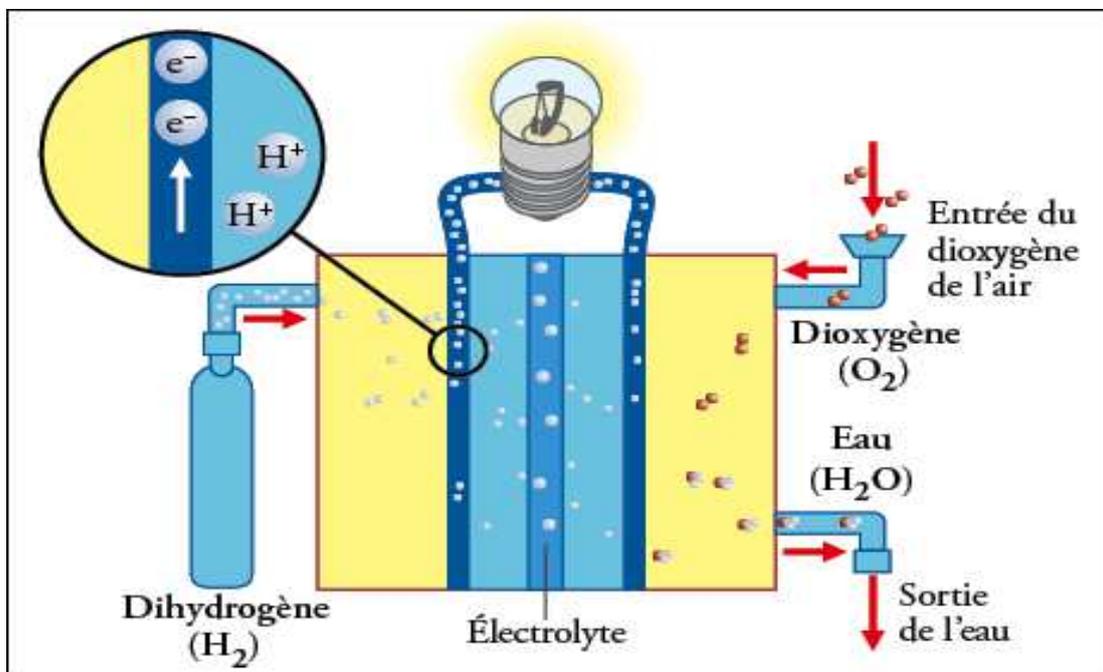
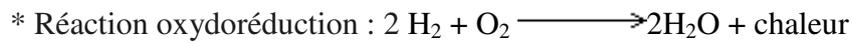
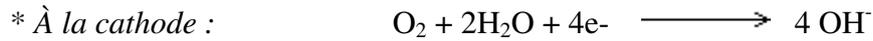
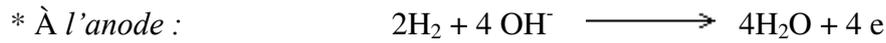


Figure I.1 : Production de l'électricité dans une pile à combustible [3].

Les équations chimiques d'oxydoréduction sont les suivantes :



L'électricité est produite par les deux électrons libérés par la molécule d'hydrogène, lors de l'oxydation de l'anode. Les protons d'hydrogène H^+ traversent la membrane séparant l'anode de la cathode et se recombinent à la cathode avec les électrons et les atomes d'oxygène. Idéalement, les seuls produits secondaires de la réaction sont de l'eau et de la chaleur.

I.1.4 Architecture d'une PàC :

La réaction électrochimique a lieu au sein d'une cellule élémentaire. Une cellule élémentaire consiste en un assemblage Electrode-Membrane-Electrode (EME) pressé entre deux plaques bipolaires.

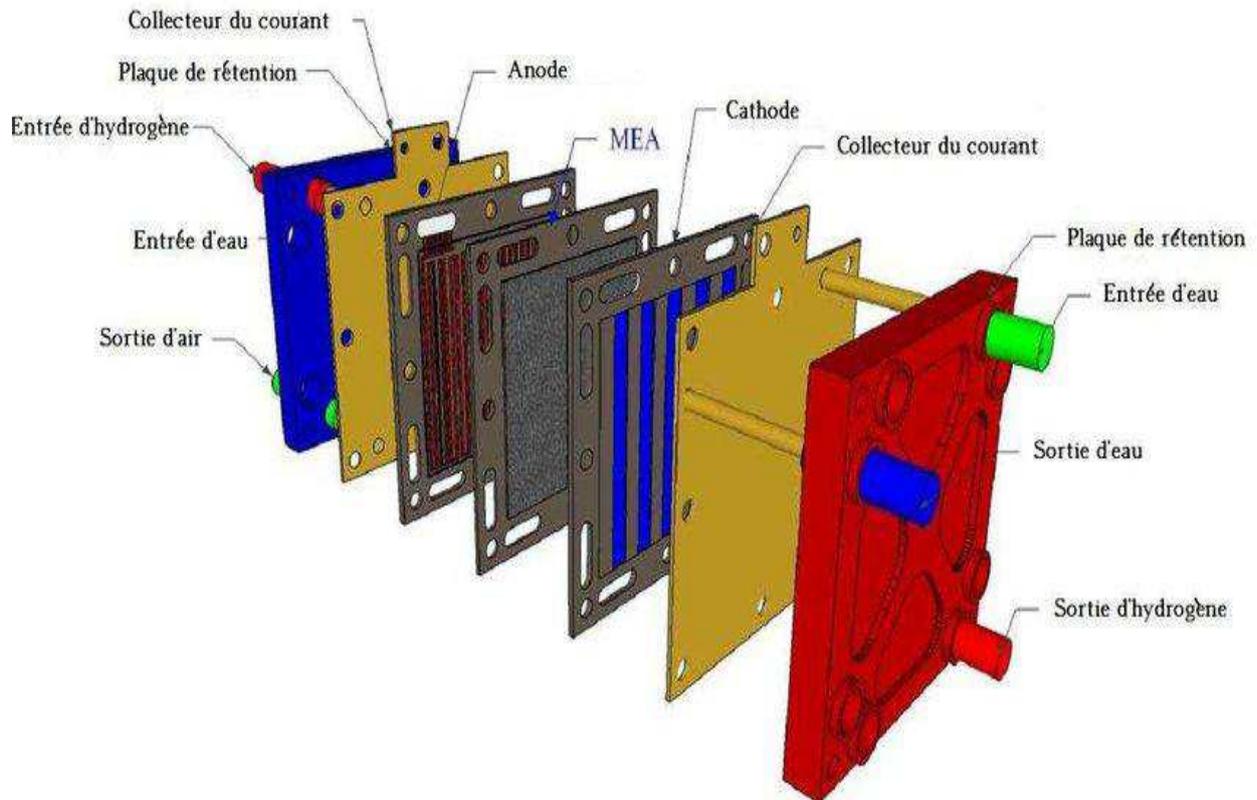


Figure I.2 : Vue structurelle d'une cellule PàC [3].

La membrane constitue le cœur de la cellule élémentaire. La membrane est un électrolyte qui est perméable aux protons d'hydrogène H^+ et imperméable aux gaz. Un assemblage EME comporte, outre la membrane, deux électrodes : l'anode et la cathode.

Elles sont exposées à un flux de gaz qui leur fournit l'apport en réducteur et en oxydant, l'hydrogène et l'oxygène. La tension obtenue avec une cellule élémentaire est inférieure à 1 volt, ce qui est insuffisant pour la majorité des applications. Pour disposer d'une source de tension suffisamment élevée, plusieurs cellules sont assemblées en série pour former le cœur de la pile, appelé STACK PàC.

I.1.5 les conditions de fonctionnement de Système [4]. :

Le STACK PàC à besoin d'un ensemble des conditions pour produire de l'énergie électrique, il doit être : alimenté en Hydrogène et en air, la membrane doit être humidifiée en permanence et la chaleur produite doit être évacuée.

Divers périphériques, appelés auxiliaires sont nécessaires à la mise en œuvre d'un générateur d'énergie à pile à combustible. L'ensemble composé de la pile à combustible et de ses composants auxiliaires est appelé système pile à combustible SPAC.

Quatre circuits principaux composent un Système PàC :

- Le circuit d'hydrogène (circuit fermé) : il alimente l'anode en hydrogène gazeux.

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

- Le circuit d'oxygène (circuit ouvert) : à la cathode, la pile est alimentée en oxygène injecté par un compresseur d'air. On trouve également des structures avec circuit air fermé et compresseur O_2 .

- Le circuit de refroidissement : il représente une partie essentielle du système PàC.

Il permet de maintenir la température de fonctionnement.

- Le circuit d'eau : le débit d'air à la cathode draine l'eau produite par la réaction.

Cette eau peut être utile pour diverses fonctions telles que l'humidification des membranes et le refroidissement.

Les composants auxiliaires sont donc indispensables au bon fonctionnement de la pile à combustible. Mais ils consomment une partie de l'énergie produite par la PàC.

I.1.6 Caractéristique électrique de la PàC :

Les pertes de puissance induites par la consommation électrique des composants auxiliaires affectent le rendement global du système. Alors que la PAC convertit l'énergie chimique en énergie électrique avec un rendement maximal d'environ 70% pour de faibles charges, le SPAC atteint un rendement maximal d'environ 50% [5].

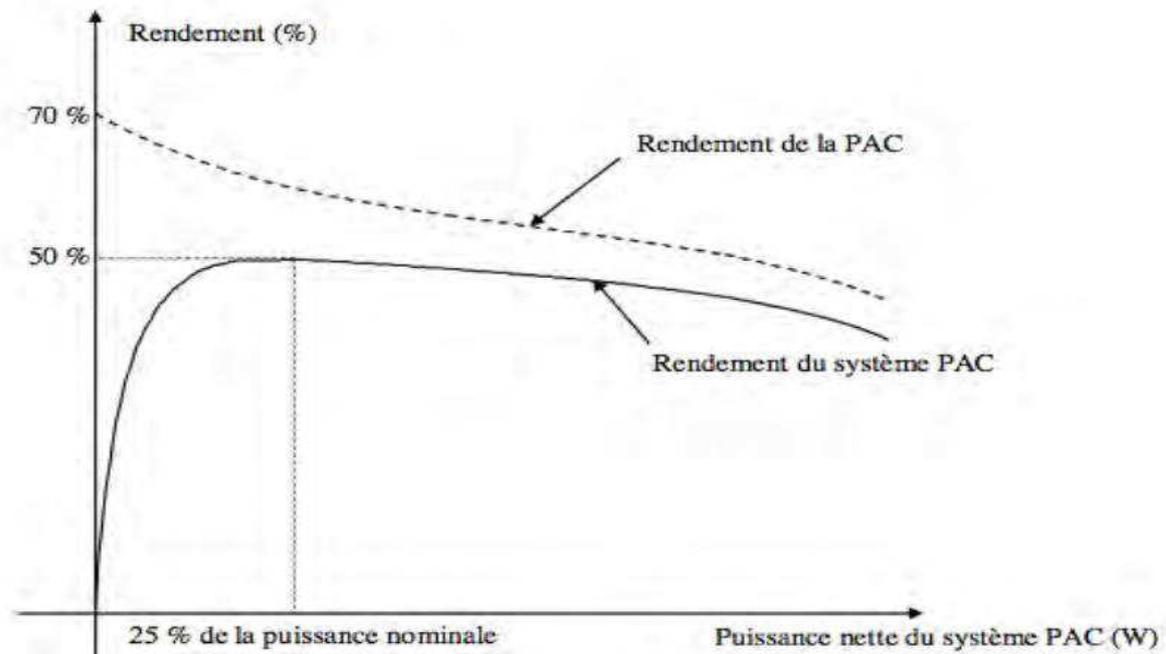


Figure I.3 : Rendements caractéristiques de la PAC et du Système PAC [05].

Pour les PAC en régime statique, la tension au niveau de la cellule élémentaire chute en fonction du courant débité à cause des pertes. Les pertes proviennent principalement de trois origines : zone d'activation, zone ohmique et zone de concentration. La Figure 4 trace la caractéristique électrique d'une pile à combustible ; elle représente la tension de la cellule en fonction de la densité de courant.

La chute de tension liée à la zone d'activation est due au démarrage des réactions chimiques à l'anode et à la cathode. Une partie de l'énergie disponible est utilisée pour briser et reformer les liaisons chimiques. La chute de tension due à la zone ohmique est causée par la résistance électrique de la membrane et de l'ensemble électrodes/plaques bipolaires. Finalement, la chute de tension due à la concentration résulte d'un manque de réactifs. En effet, lorsque la densité de courant devient élevée la diffusion des gaz dans les électrodes n'est plus assez rapide pour entretenir la réaction [05].

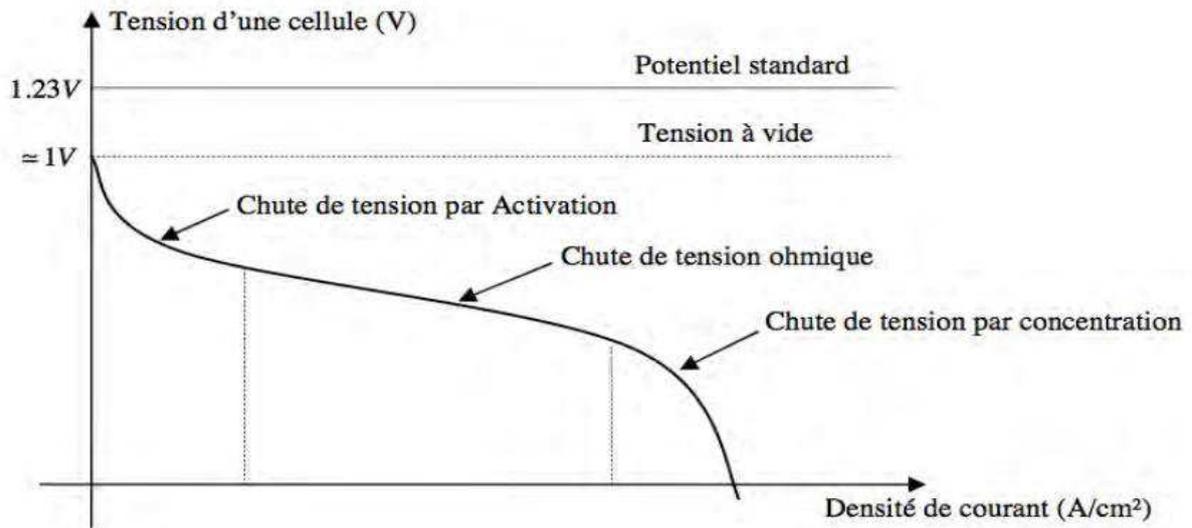


Figure I.4 : Courbe de polarisation classique d'une cellule de PàC [06].

I.1.7 PàC dans l'industrie automobile:

Comme la production d'énergie électrique est réalisée sans émissions de gaz à effet de serre, ce type de véhicule est considéré non polluant et apparaît donc comme une solution intéressante de mobilité durable.

Plusieurs programmes de véhicules à PàC ont été lancés au début des années 90. TOYOTA MOTOR CORPORATION a présenté son premier prototype en 1996 en utilisant une base du véhicule RAV-4 LV. En 2002, elle a commercialisé le premier véhicule à PàC, la Toyota FCHV. Le dernier concept de véhicule hybride à PàC a été présenté au salon de Genève 2012, c'est la Toyota FCV-R. La commercialisation de ce concept est fait en 2015 pour [07].



Figure I.5 : Toyota FCV-R



Figure I.6 : STACK PàC 100 kW développée par Intelligent Energy 2015

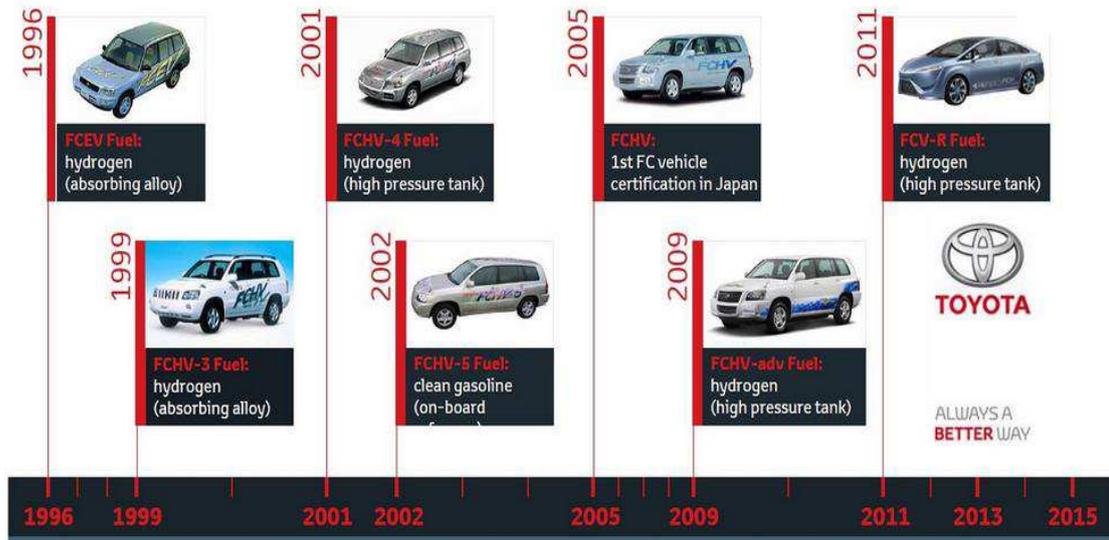


Figure I.7 : développement des véhicules à PAC [07]

PàC présentent des caractéristiques intrinsèques insuffisantes (temps de démarrage long, dynamique lente, défaillances réversibles...) et une non-réversibilité en puissance qui ne leur permettent pas de répondre directement aux exigences des applications embarquée. En effet, outre une exigence de continuité de service, celles-ci sont caractérisées par un important ratio puissance crête / puissance moyenne et des transitoires de puissance très rapides par rapport aux dynamiques disponibles de la PàC .

Pour répondre à ce problème, il convient donc d'adjointre au générateur PàC de source d'énergie auxiliaires capable tout à la fois de fournir ou de récupérer l'énergie « impulsionnelle » (accélération, freinage) et de pallier les défaillances temporaires de la PàC (noyage des diffuseurs de gaz, diminution accidentelle de l'alimentation en réactif). Aujourd'hui, les super condensateurs (SCs) ont atteint un stade de développement (efficacité énergétique, durée de vie élevée > 1000000 Cycles, puissance massique élevée de 0.1 à 10 kW/kg, coût réduit) qui leur permettent de répondre aux exigences de ce stockage auxiliaire [8].

I.2.1 Supercondensateurs à double couche électrique (SCs) :

Les supercondensateurs possèdent une puissance instantanée plus importante que celle des batteries et une énergie plus grande que celle des condensateurs classiques, le supercondensateur combine les avantages des batteries classiques - stockant beaucoup d'énergie, et ceux d'un condensateur électrochimique - fournissant une puissance élevée et une grande durée de vie.

Un supercondensateur est constitué de quatre éléments principaux : les collecteurs de courant, la matière active (charbon active), l'électrolyte et le séparateur. Ces éléments sont assemblés pour former une cellule électrochimique complète et les collecteurs de courant sont reliés à un circuit électrique externe comme il est représenté à la figure 8 [9].

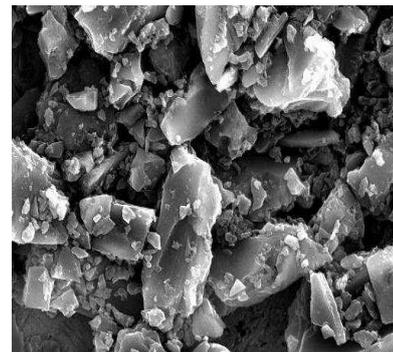
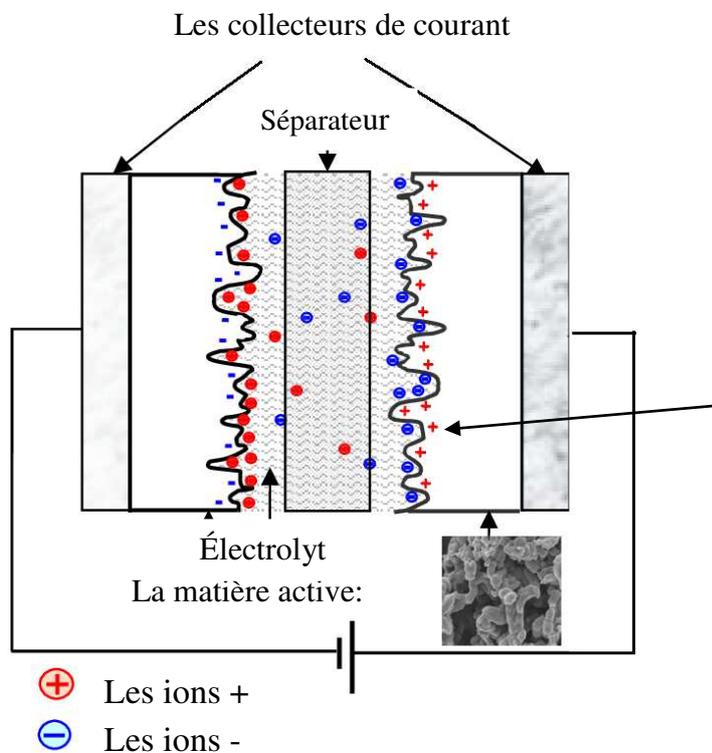


Figure 8 : Schéma d'un supercondensateur

Figure 9 : Charbon actif (50µm)

- Les collecteurs de courant font le lien entre la matière active et le circuit électrique extérieur. Leur fonction est de collecter efficacement les charges développées au niveau de la matière active.

- L'électrolyte est une substance conductrice contenant des ions mobiles. Il peut s'agir d'un solvant contenant des ions dissous (électrolyte aqueux ou organique), ou d'un liquide ionique pur, sans solvant. Les liquides ioniques sont très onéreux.

- Le séparateur est utilisé pour éviter les courts-circuits dans le système en isolant électroniquement les deux électrodes, mais ce séparateur doit tout de même laisser passer les ions de l'électrolyte.

- La matière active est le matériau poreux de l'électrode sur laquelle les ions sont adsorbés. C'est l'interface électrode / électrolyte qui est à la base du stockage de l'énergie dans les condensateurs à double couche électrochimique que sont les supercondensateurs.

I.2.2 Positionnement par rapport aux batteries

Le diagramme de RAGONE figure 10 représentant l'énergie massique en fonction de la puissance massique, pour les systèmes usuels de stockage d'énergie électrique, la double échelle permet de comparer des dispositifs aux performances couvrant plusieurs ordres de grandeur. Les lignes diagonales indiquent le temps caractéristique de charge/décharge.

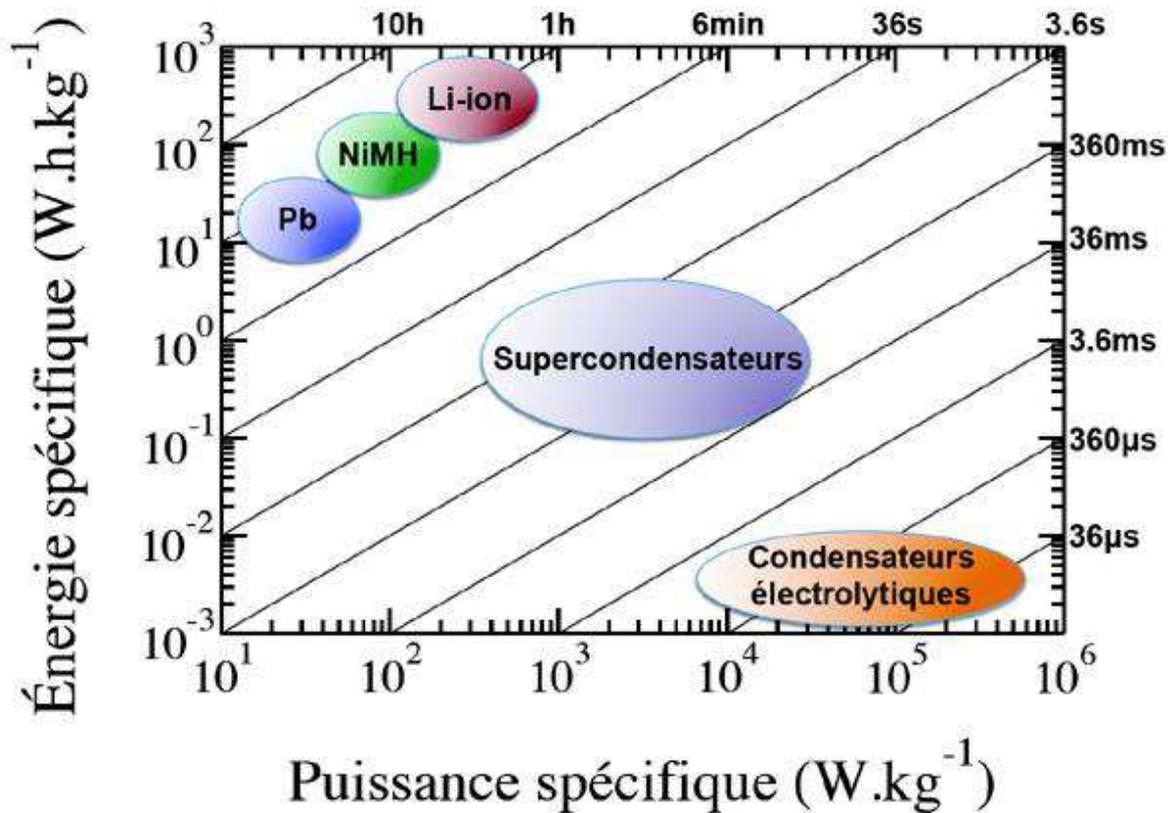


Figure 10 : diagramme comparatif de puissance [10].

Ce diagramme montre que les condensateurs électrolytiques possèdent une très grande densité de puissance mais une très faible énergie spécifique. Ils sont utilisés généralement pour des constantes de temps inférieures à quelques centaines de ms. Les batteries ont une

densité de puissance très faible et une énergie spécifique élevée. Elles peuvent être utilisées avec une constante de temps supérieure à la minute,

Entre les batteries et les condensateurs électrolytiques on trouve les supercondensateurs qui sont utilisés pour une utilisation de stockage de l'énergie avec une constante de temps inférieure à quelques dizaines de secondes. le Tableau 2 résume les performances des éléments de stockage présentés ci-dessus [11].

	Condensateur électrolytique	Supercondensateur	Batterie
Temps de charge	$\mu s < t < ms$	$1s < t < 30s$	Entre 1 heure et 5 heures
Temps de décharge	$\mu s < t < ms$	$1s < t < 30s$	Entre 0.3 heure et 3 heures
Rendement charge/décharge	$> 95\%$	entre 85% et 98%	Entre 70% et 85%
Densité de puissance [W/kg]	$> 10^6$	10^4	$< 10^3$
Densité d'énergie [Wh/kg]	entre 0,01 et 0,1	entre 1 et 10	Entre 10 et 100
Durée de vie nombre de cycles	10^{10}	10^6	10^3

Tableau 2 : Comparaison entre quelques éléments de stockage de l'énergie [11].

D'après les données du tableau 1, il est clair que le supercondensateur est un élément potentiel utilisable pour le stockage tampon de l'énergie électrique embarquée. Il peut être utilisé comme source pour les demandes de fortes puissances pendant quelques secondes jusqu'à quelques dizaines de secondes. On peut noter que le nombre de cycles de charge/décharge que peut supporter un supercondensateur est environ 1000 fois plus élevé que dans le cas d'une batterie. De plus, le supercondensateur peut fournir ou absorber un courant très élevé, ce qui est très important pour la récupération de l'énergie lors du freinage par exemple. Les supercondensateurs présentent une résistance série plus faible que les batteries. Le rendement de charge/décharge d'un super-condensateur est généralement supérieur à 95% alors que dans le cas d'une batterie il est compris entre 70 et 85% [12].

I.2.3 Fabricants de supercondensateurs actuels :

Plusieurs sociétés dans le monde fabriquent et commercialisent actuellement les supercondensateurs, le tableau 4 représente les principaux fabricants des supercondensateurs ainsi que la gamme de produits et leurs caractéristiques :

Nom de la société	pays	Nom de l'élément	Gamme de capacité	Tension de fonctione	Température de fonctionnement	Résistance interne
AVX	Usa	Bestcab	0,022/0,560 F	3,6/12V	-20 /+70 ° C	25/350 mΩ
COOPER	Usa	Powerstor	0,47/100F	2,5/5,5V	-25 /+70 ° C	25/400 mΩ
ELNA	Usa	Elna dynacap	0,047/200F	2,5/6,3V	-25 /+85 ° C	0,01/300 mΩ
EVANS	Usa	Capattery	0,033/1,5F	5,5/11V	-55 /+85 ° C	0,6/4 mΩ
MAXWELL	Usa-ch	Boostcap	2/3000F	2,5/5V	-40 /+65 ° C	0,37/800 mΩ
MAXWELL	USA-ch	Boostcap modules	6/600F	16/160V	-40 /+65 ° C	2/65 mΩ
NESSCAP	Corée	Edlc+ Pseudocapacior	3/5000F	2,3/2,7V	-40 /+60 ° C	0,4/200 mΩ
NESSCAP	Corée	Edlc module	1,5/238F	2,3/340V	-40 /+60 ° C	3,6/200 mΩ
NEC /TOKIN	Japon	Super capacitor	0,01/6,5F	3,5/12V	-40 /+85 ° C	0,4/200 mΩ
TAVRIMA	Canada	Escap	0,13/160F	14/300V	-30 /+85 ° C	9,6/300 mΩ
CAP-XX	Australie	Super capacitor	0,09/4F	2,25/4,5V	20 /+70 ° C	18/110 mΩ
BATSCAP	Français	Super capacite	5/9000F	2,3/2,7V	-30/+60 ° C	0,2/330 mΩ

Tab 3 : Fabricants de super-condensateurs actuels [13]

La société Maxwell produit et commercialise une large gamme de cellules de supercondensateurs ainsi que des modules pour les applications de forte puissance. On trouve des capacités de valeur pouvant aller de 5F à 3000F. La tension nominale d'une cellule est de 2,5 à 2.7V.

Maxwell fabrique les supercondensateurs sur quatre gammes différentes Figure 10 :

- Petites cellules de capacité inférieure à 10F et de tension nominale de 2.5V
- Cellules intermédiaires de capacité entre 120 et 350F et de tension nominale de 2.5V
- Grandes cellules de capacité entre 650 et 3000F et de tension nominale de 2.7V

- Modules de supercondensateurs : de capacité entre 20 et 500F et de tension nominale de 15V à 390V.



Figure 10 : différentes gammes de produits Maxwell [13]

I.2.4 Avantages et inconvénients des supercondensateurs

Les avantages

- Très haute tension cellulaire est possible.
- Haute densité de puissance.
- Peut résister des températures extrêmes.
- Charge et décharge très rapide (une dynamique rapide).
- Longue durée de vie.

Les inconvénients

- Faible densité d'énergie.
- Des mises en série sont nécessaires pour obtenir des tensions plus élevées que les quelques volts d'une cellule élémentaire.
- Le prix des supercondensateurs est plus élevé que celui des batteries.

I.3.1 La cellule photovoltaïque

Le principe d'une cellule photovoltaïque est de transformer des photons absorbés par un semi-conducteur en porteurs de charges électriques (électrons et trous). Cette création de charges va entraîner la création d'une différence de potentiel aux bornes d'électrodes et d'un courant électrique dans un circuit connecté aux électrodes. La Figure I.11 présente le principe de fonctionnement d'un générateur photovoltaïque d'électricité [14].

- 1) Sous l'action du rayonnement de la lumière du soleil, les électrons sont décrochés de leurs atomes.
- 2) Les trous et les électrons commencent à déplacer vers la jonction P-N
- 3) Quand les trous rejoignent les électrons au niveau de la jonction P-N une tension est générée si une connexion extérieure est établie, un courant électrique continu va créer .

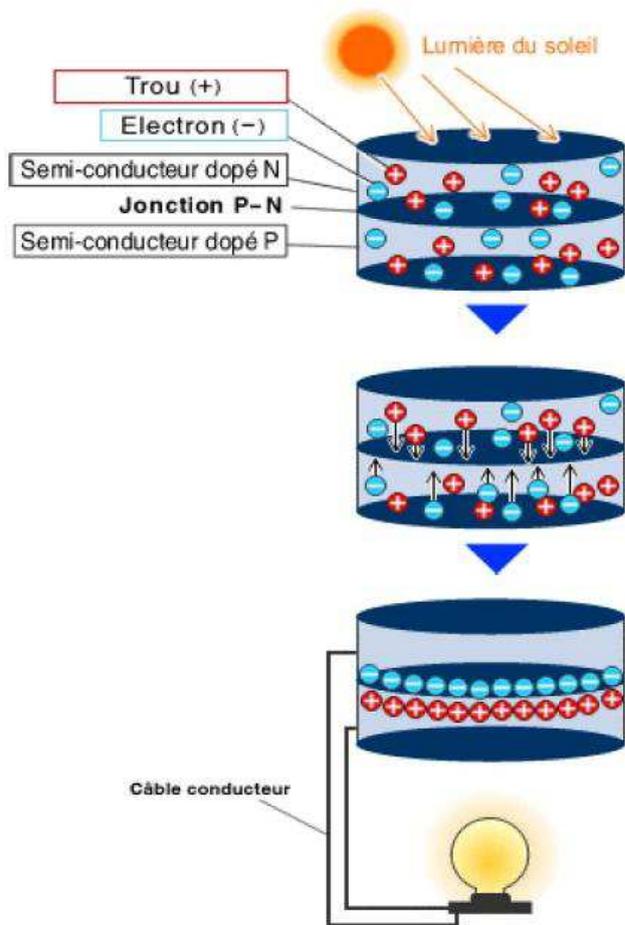


Figure I.10 : Principe de la conversion photovoltaïque.

I.3.2 Type de cellules photovoltaïques

Il existe différents types de cellules photovoltaïques, les plus répandues sont constituées de semi-conducteur, principalement à base de Silicium [15]. On trouve trois principaux types de cellules :

1) Les cellules au silicium monocristallines :

Les cellules monocristallines proviennent d'un seul et même bloc cristal de silicium. Pour obtenir des cellules photovoltaïques, ce cristal est découpé en tranches très fines. L'aspect de ces cellules est uniforme et de couleur foncée.

AVANTAGES : avec cette technologie, la production des cellules solaires est optimale. Les cellules monocristallines offrent le meilleur rendement (jusqu'à 20 %). Les cellules solaires issues de cette technologie ont une bonne durée de vie (jusqu'à 30 ans).

INCONVENIENTS : le coût de production est élevé et les cellules sont donc chères à la vente. On constate avec cette technologie peu de rendement par mauvais temps.

2) Les cellules au silicium poly-cristallines

Lorsque le silicium fondu refroidi, on observe la formation de cristaux, de tailles et formes différentes. Les cellules photovoltaïques issues de cette technologie ne sont alors pas uniformes et sont de couleur bleu foncé.

AVANTAGES : le coût de production est moins élevé que pour les cellules monocristallines. Les cellules solaires ont également une bonne durée de vie (jusqu'à 30 ans). Aussi, ces cellules solaires sont dotées d'une bonne flexibilité d'irradiation qui donne un rendement correct, même par temps nuageux.

INCONVENIENTS : les cellules offrent un rendement inférieur à la technologie monocristalline (de 11 à 15 %) [15].

3) Les cellules au silicium amorphe

Les cellules photovoltaïques amorphes sont fabriquées avec un gaz de silicium. Ce gaz peut être projeté ensuite sur différents supports comme des plaques de verre, du plastique souple ou encore du métal, via un procédé de vaporisation sous vide. Les cellules sont de couleur gris foncé.

AVANTAGES : il s'agit d'un type de cellule bon marché, que l'on retrouve dans la plupart des objets du quotidien fonctionnant à l'énergie solaire (calculatrice et montre solaire par exemple). Cette technologie est pratique car utilisable sur de nombreux supports et elle ne requiert pas beaucoup d'ensoleillement.

INCONVENIENTS : le rendement est faible (7 à 8 %) et la durée de vie des cellules solaires est limitée à une dizaine d'années [15].



Figure I.11 : cellules monocristallin (gauche), poly-cristalline (milieu) et poly-cristallin (droite).

I.3.3 Les caractéristiques électriques des cellules et modules

Sous un éclairage donné, toute cellule photovoltaïque est caractérisée par une courbe courant-tension, représentant l'ensemble des configurations électriques que peut prendre la cellule. Trois grandeurs physiques définissent cette courbe [16] : **Eclairement E**

- Tension à vide : V_{co} . Cette valeur représenterait la tension générée par une cellule éclairée non raccordée.
- Courant court-circuit : I_{cc} . Cette valeur représenterait le courant généré par une cellule éclairée raccordée à elle-même.
- Point de puissance maximal : MPP (en anglais : maximal power point) obtenu pour une tension et un courant optimaux : V_{mpp} , I_{mpp} .

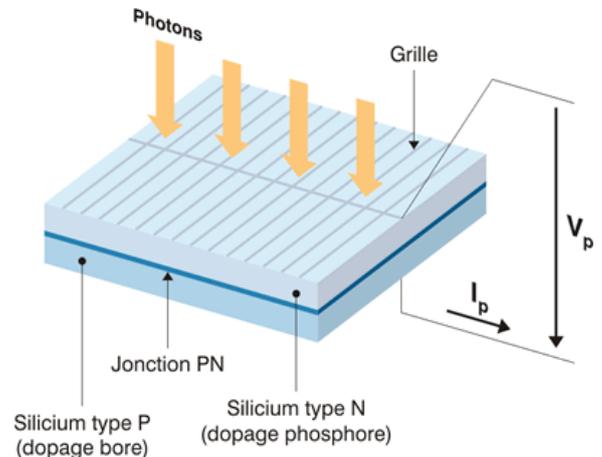


Figure I.12 : cellule photovoltaïque

Pour permettre une comparaison de l'efficacité de différentes cellules, on définit ces caractéristiques dans des conditions de test bien précises (STC = Standard Test Conditions). Ces conditions sont : émission lumineuse de $1\ 000\ \text{W/m}^2$, température de $25\ ^\circ\text{C}$, conditions spectrales Air Mass 1.5 (composition du spectre identique au spectre solaire lorsqu'il traverse une épaisseur et demie d'atmosphère, ce qui correspond à un angle d'incidence de 41.8° par rapport à l'horizontale).

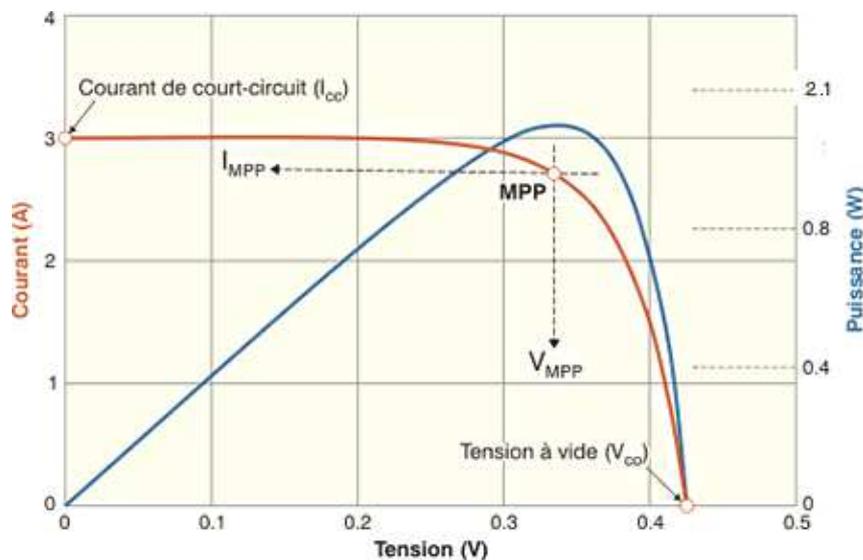


Figure I.13 : la courbe courant-tension (I-V)

I.3.4 Raccordement des cellules entre elles :

La cellule constitue donc un générateur de très faible puissance, insuffisant pour les applications électriques courantes, pour que l'électricité générée soit utilisable pour nos applications électriques, il est donc nécessaire d'associer entre elles un grand nombre de cellules.

Les modules généralement présentés sous forme des cellules solaire sont constitués d'un certain nombre de cellules élémentaires placées en série afin de rendre la tension à la sortie utilisable, ces modules sont ensuite associés en réseau (série-parallèle) de façon à obtenir les tensions/courants désirés[17] .

Association en parallèle

Par association en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et le courant résultant correspond à la somme des courants générés par chacune des cellules.

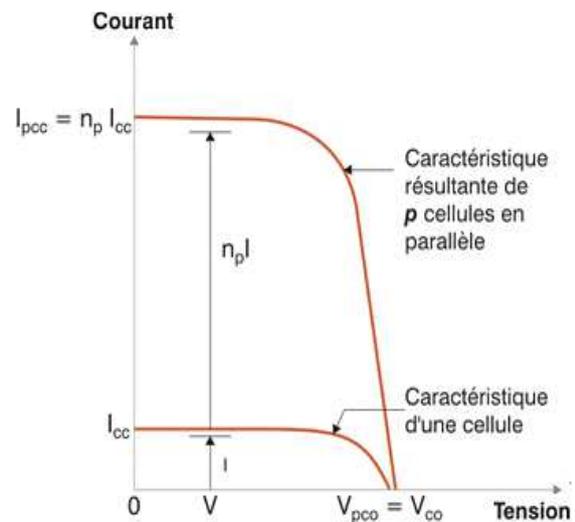


Figure I.14 : caractéristique des cellules

Association en série

Par association en série, les cellules sont traversées par le même courant et la tension résultante correspond à la somme des tensions générées par chacune des cellules.

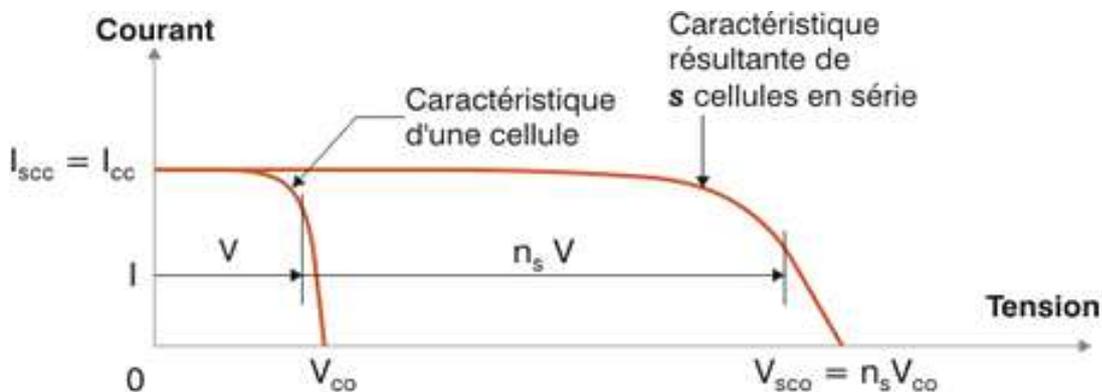


Figure I.15 : caractéristique des cellules en série

I.3.5 Les avantages et les inconvénients de l'énergie solaire PV :

Les avantages :

- Les avantages de l'électricité solaire photovoltaïque sont multiples :
- La production de cette électricité renouvelable est propre, n'est pas toxique.
- Les systèmes photovoltaïques sont extrêmement fiables.
- La lumière du soleil étant disponible partout, l'énergie photovoltaïque est exploitable aussi bien en montagne dans un village isolé que dans le centre d'une grande ville.
- L'électricité photovoltaïque est produite au plus près de son lieu de consommation, de manière décentralisée, directement chez l'utilisateur.
- l'électricité solaire photovoltaïque a pour qualité sa fiabilité, la durée de vie des capteurs supérieure à 25 ans, son autonomie, son faible impact sur l'environnement.
- Le coût de fonctionnement des cellules solaire est très faible car leur entretien est très réduit, et ils ne nécessitent ni combustible, ni transport, ni personnel hautement spécialisé.
- Les systèmes photovoltaïques sont fiables : aucune pièce employée n'est en mouvement. Les matériaux utilisés (silicium, verre, aluminium), résistent aux conditions météorologiques extrêmes.

Les inconvénients :

- Production d'énergie qui dépend de l'ensoleillement, toujours variable.
- Le coût d'investissement des cellules solaire et des capteurs est élevé.
- S'il faut stocker l'énergie avec des batteries, le coût de l'installation augmente.
- Le rendement réel de conversion d'un module est faible.
- Le rendement électrique diminue avec le temps (20% de moins au bout de 20 ans).
- Pollution à la fabrication.

I. 3.6 Les cellules PV dans l'industrie automobile :

Plusieurs programmes des véhicules hybrides utilisent les cellules solaire comme source d'énergie auxiliaire pour permettre d'augmenter leurs autonomies, parmi ces programmes il a été dévoilé au salon de Los Angeles 2018, la phase 2 de la quatrième génération de Toyota Prius rechargeable, équipée de toit à cellules solaire qui est capable de fournir une puissance comprise entre 300 et 350 W, soit une autonomie électrique maximale de 5 km générée par jour[18] .

Au niveau du fonctionnement :

Quand le véhicule est en stationnement, les cellules solaire recharge le supercondensateur, lorsque le véhicule est en marche, les cellules solaire permet de produire à la fois l'énergie nécessaire aux systèmes électriques 12V (multimédia, éclairage...etc.) mais il peut également réduire la consommation de l'hydrogène de système hybride.

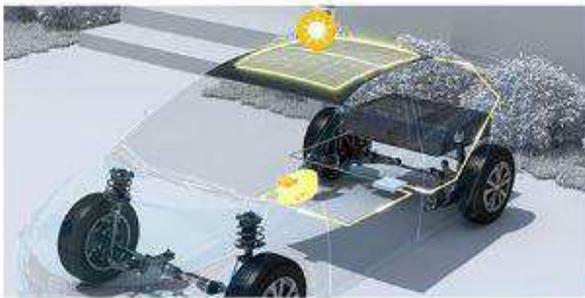


Figure I.17 : Chargement de SC

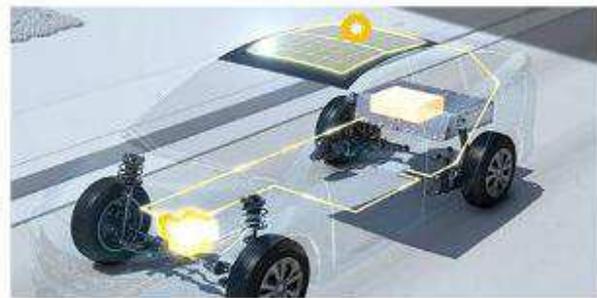


Figure I.18 : Réduire la consommation

Conclusion

Le principal objectif de ce premier chapitre est de présenter les différents types de source d'énergie à utiliser dans notre étude (la pile à combustible type (PEMFC) et le supercondensateur et l'énergie solaire), leur domaine d'application, les avantages de celles-ci par rapport à d'autres sources d'énergies, le principe de fonctionnement et les caractéristiques électriques de chacune de ces sources. Aussi leur utilisation dans les véhicules hybride. Les sources d'énergie étant choisies, elles seront modélisées dans les chapitres.

CHAPITRE II
MODILISATION ET SIMULATION
SYSTÈME HYBRIDE

Introduction

Ce chapitre, nous présenterons la modélisation des sources énergétique et la commande de ce système, la pile à combustible, la photovoltaïque, le super condensateur et les convertisseurs statiques. La modélisation et la simulation ont été effectuées sous le logiciel MATLAB/Simulink.

II.1 Modélisation de la source hybride ;

II.1.1 Caractéristique électrique de la pile à combustible [19] :

La potentielle thermodynamique théorique de la pile à combustible PEMFC H₂/O₂ à 25°C et à 1atm est de l'ordre de 1,23 V, mais le potentiel réel (EPAC) de la cellule décroît par rapport à la potentielle thermodynamique d'équilibre quand le courant débite, cette déviation à la valeur du potentiel de Nernst, est due aux pertes irréversibles appelées polarisations V (surtensions), par conséquent, l'expression de la tension d'une cellule s'exprime comme suit:

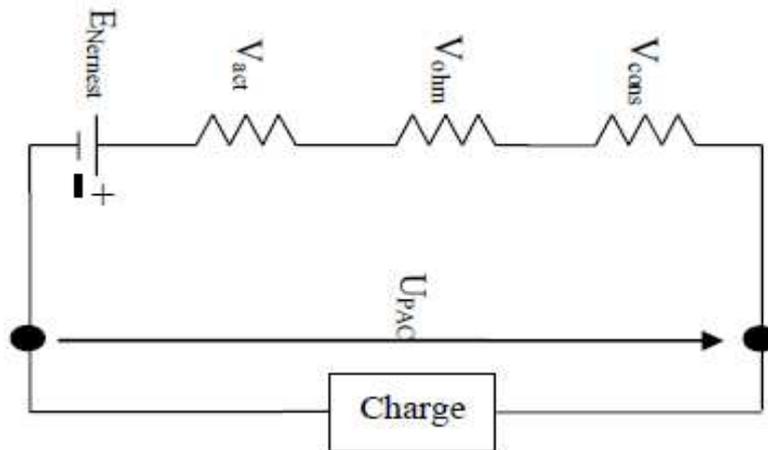


Figure II.1 : schéma équivalent d'une PEMFC

$$U_{PAC} = E_{Nernst} - V_{act} - V_{ohm} - V_{conc} \quad (II.1)$$

Vact : Polarisation d'activation.

Vohm : Polarisation ohmique.

Vconc : Polarisation de concentration.

$$E_{Nernst} = 1.229 - 0.85 \times 10^{-3} \times (T - 298.15) + 4.31 \times 10^{-5} \times [\ln(P_{H_2}) + \frac{1}{2} \ln(P_{O_2})] \quad (II.2)$$

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

PH₂ : Pressions partielles à l'interface de l'hydrogène (atm).

PO₂ : Pressions partielles à l'interface de l'oxygène (atm).

a) Polarisation d'activation

Les pertes d'activations sont dues au démarrage des réactions chimiques, ils sont essentiellement dus aux réactions cathodiques. La relation entre les pertes d'activations et la densité de courant est exprimée dans l'équation suivante :

$$V_{act} = \epsilon_1 + \epsilon_2 \times T + \epsilon_3 \times T \times \ln(CO_2) + \epsilon_4 \times T \times \ln(IPAC) \quad (II.3)$$

IPAC : courant de fonctionnement de la pile.

ε1, ε2, ε3, ε4 : sont des coefficients paramétriques appropriés à chaque modèle physique de la pile à combustible PEMFC .

On peut exprimer la tension d'activation en relation avec la densité du courant I_{fc} délivré par la pile par l'équation suivante:

$$V_{act} = A \log \left[\frac{i_{fc} - i_n}{i_0} \right] \quad (II.4)$$

- i_0 : Le courant d'échange définissant à vide les échanges électrode-électrolyte.
- i_n : Le courant interne permettant de tenir compte d'une éventuelle traversée de gaz et/ou d'électrons à travers l'électrolyte.
- A : La pente de la droite de "Tafel".

b) Polarisation ohmique

Les pertes ohmiques sont dues à la résistance qu'opposent les électrodes et les plaques bipolaires à la circulation des électrons et l'électrolyte au passage des protons. La chute de tension correspondante s'écrit :

$$V_{ohm} = R_m (i_{fc} - i_n) \quad (II.5)$$

Tel que: R_m est la résistance totale de la pile à combustible.

c) Polarisation de concentration

Les chutes de tension par concentration résultent d'un manque de réactifs. Lorsque la densité de courant devient élevée la diffusion des gaz dans les électrodes n'est plus assez rapide pour entretenir la réaction. Ces pertes sont données par la relation suivante :

$$V_{con} = B \log \left[\frac{i_{fc} - i_n}{i_{Lim}} \right] \quad (II.6)$$

- B : Constante de transport ou de transfert de masse.
- I_{FC} : Densité du courant de fonctionnement permanent (A/cm^2).
- I_{Lim} : Densité du courant limite.

Pour une pile à combustible, plusieurs modèles ont été développés pour approuver et analyser la performance, le comportement et la conception selon l'objectif recherché. Il existe trois principaux modèles statiques, qui décrivent la courbe de polarisation d'un stack PEM, à savoir : 1 modèle statique de Larminie et Dicks , le modèle d'Amphlett et al [20] et le modèle de Chamberlin-kim [21]. Nous allons choisir le modèle statique le plus simple .

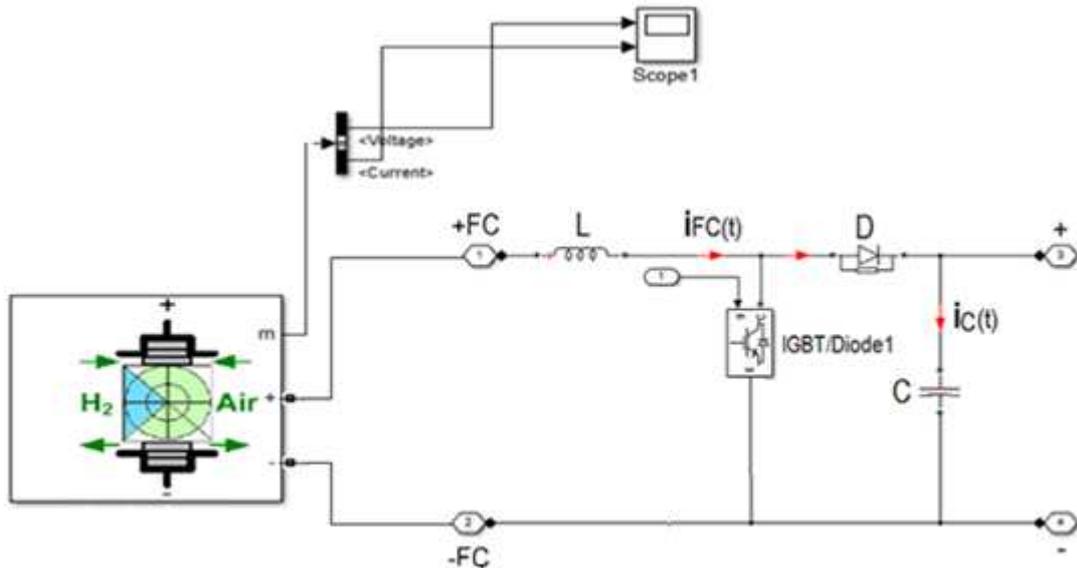


Figure II.2 : model de la PEMFC+Boost

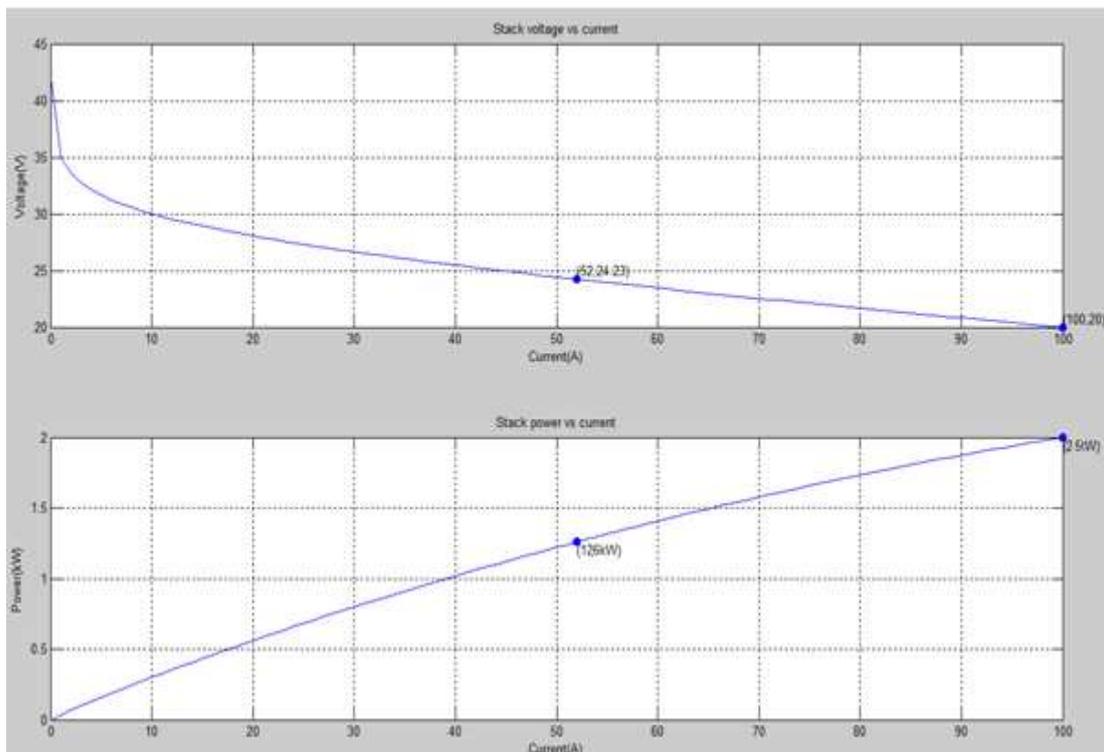


Figure21 : Caractéristique Tension-puissance de la pile PEMFC

II.1.2 Caractéristique électrique super-condensateur :

La modélisation la plus simple d'un supercondensateur est composée d'une capacité idéale en série avec une résistance (modèle RC simple), mais ce modèle ne permet pas de prendre en compte tous les phénomènes existants au sein d'un supercondensateur. Un autre modèle similaire au précédent qui modélise l'effet de l'auto-décharge en ajoutant une résistance en parallèle avec la capacité [22]. Il existe un autre modèle non linéaire qui contient plusieurs branches RC en parallèle. La première branche de ce dernier possède une capacité variable en fonction de la tension, mais ce modèle est pris et simplifié à deux branches RC. La première branche dite principale décrit les phénomènes rapides (charge, décharge) et la deuxième dite lente pour décrire la redistribution interne de l'énergie après les dits phénomènes [23].

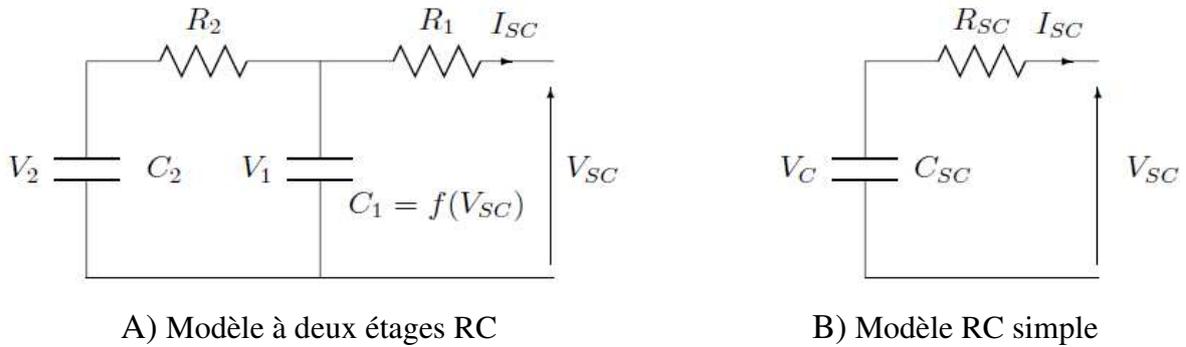


Figure II.3 : Schémas électriques équivalents d'un super-condensateur

A partir du modèle à deux étages RC de la figure 22 , les équations suivantes peuvent être extraites [10]:

$$\begin{cases} C_1 \frac{dV_1}{dt} = \frac{V_2 - V_1}{R_2} - I_{SC} \\ C_2 \frac{dV_2}{dt} = - \frac{V_2 - V_1}{R_2} \\ V = V_1 - R_1 I_{SC} \end{cases} \quad (II.7)$$

Ce modèle peut aisément être modélisé grâce à une représentation sous forme d'équations d'état[13] :

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ y = Cx + Du \end{cases}$$

Ou

$$x = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix}, u = I_{SC}, y = V_{SC}, A = \begin{bmatrix} -\frac{1}{R_2 C_1} & \frac{1}{R_2 C_1} \\ \frac{1}{R_2 C_2} & -\frac{1}{R_2 C_2} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} \frac{1}{C_1} \\ 0 \end{bmatrix}, C = [1 \ 0] \quad (II.8)$$

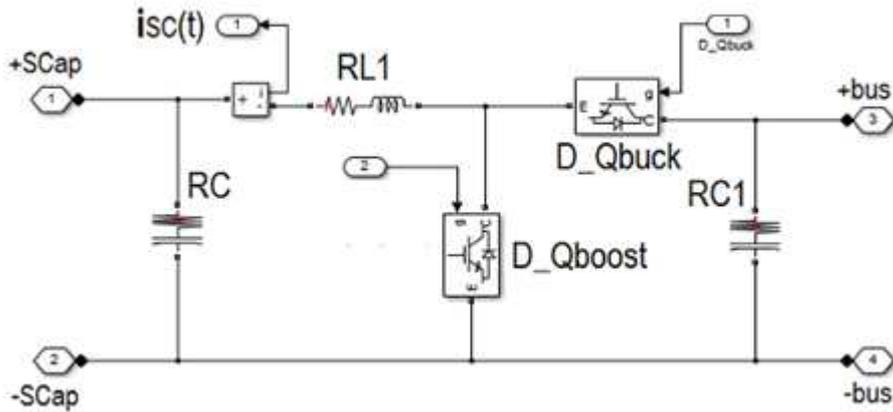


Figure II.4 : model SC+ Buck-Boost

II.1.3 Modèle de la cellule photovoltaïque :

La cellule solaire est l'élément de base d'un générateur photovoltaïque. La modélisation du comportement électrique du module photovoltaïque peut être étendue au générateur photovoltaïque selon sa configuration, nombre de modules en série et en parallèle.

Modèle mathématique (Cs):

Nous rencontrons dans la littérature plusieurs modèles du générateur photovoltaïque qui diffèrent entre eux par la procédure et le nombre des paramètres intervenants dans le calcul de la tension et du courant final du générateur photovoltaïque, parmi ces modèles nous avons utilisé le modèle le plus simple et les plus utilisé qui est le suivant :

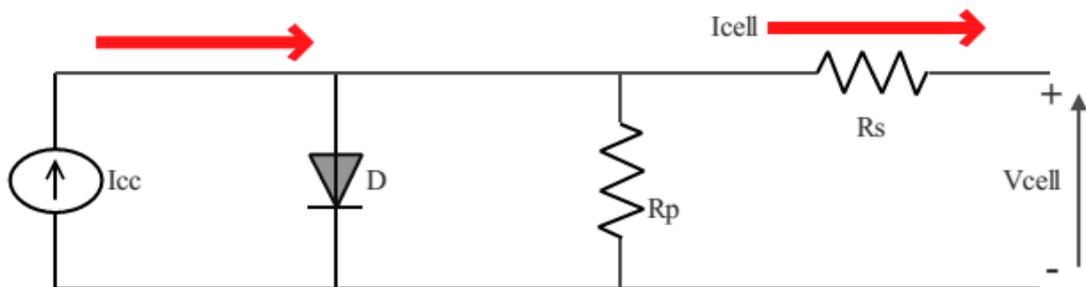


Figure II.5 : Schéma électrique équivalent du modèle à une diode [11]

A partir du schéma figure 31 le courant généré par le générateur photovoltaïque est donné Par la loi de KIRCHHOFF :

$$I = I_{ph} - I_d - I_{rsh}$$

$$I_{ph} = P_1 * E_s(1 + P_2(E_s - E_{sref}) + P_3(T_j - T_{jref})) \quad (II.9)$$

- E_{sref}, T_{jref} : représentent l'éclairement et la température sous conditions STC.
- T_j : température de jonction.
- P_1, P_2, P_3 : paramètres constants.

$$I_d = I_{sat} * [\exp(\frac{q*V}{nKT}) - 1] \quad (II.10)$$

Avec :

- I_{sat} : courant inverse de saturation de la diode.
- q : Charge élémentaire ($1.6.10^{-19}$ C).
- K : constante de Boltzmann ($1.38.10^{-23}$ j/k).
- n : le facteur de non idéalité de la photopile ($1 < n < 2$).
- T : la température de la jonction en K
- I_d : le courant circulant dans la diode
- V : la tension de sortie.

Donc :

$$I_{cell} = I_{cc} - I_{sat} * [\exp(\frac{q*V}{nKT}) - 1] \quad (II.11)$$

Pour une charge qui tend vers l'infini, la tension de cellule tendra vers V_{co} qui est la tension en circuit ouvert. On prend les résistances de contacts et les pertes ohmiques en considération afin de simuler le cas réel, donc nous ajoutons au schéma équivalent une résistance série (R_s) et une résistance parallèle (R_p), le modèle de la cellule devient [11]:

$$I_{cell} = I_{cc} - I_{sat} * [\exp(\frac{q*(V+R_s I)}{nKT}) - 1] - I_p \quad (II.12)$$

$$I_p = \frac{V + R_s I}{R_p}$$

L'expression de la tension de la cellule peut être donnée comme suit [11]:

$$\begin{cases} -I_d + I_{cc} - \frac{V_D}{R_p} - I_{PV} \\ V_{PVcell} = V_D - R_s I_{PV} \end{cases} \quad (II.13)$$

$$\begin{cases} V_{PV} = N_s * V_{PVcell} \\ N_s \quad \text{C'est le nombre des cellules en séries.} \end{cases}$$

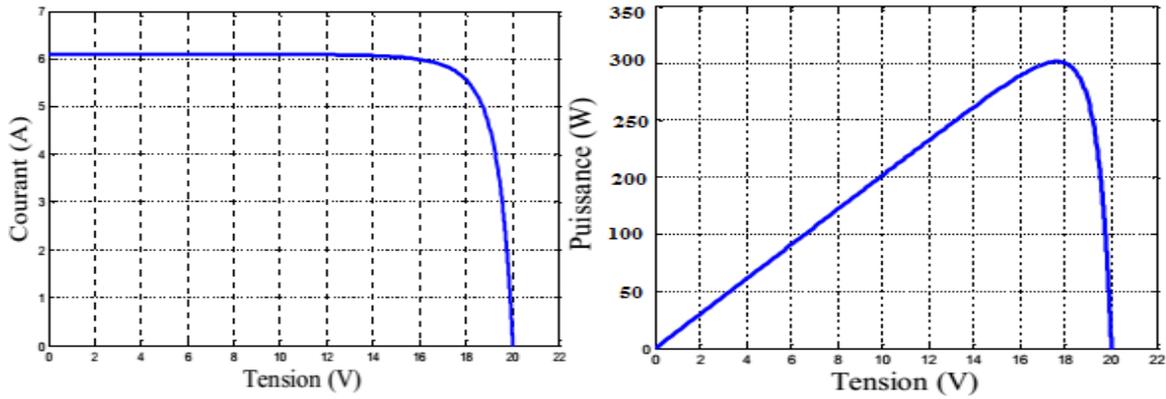


Figure II.6 : caractéristiques Ipv et PPv dans les conditions standards

II.1.4 Dimensionnement de la pile à combustible :

Comme on l'a expliqué précédemment, nous avons choisi une tension du bus DC égale à 100V. Pour déterminer le nombre de cellules de la PAC à mettre en série on constate qu'une élévation d'un facteur 2 via le convertisseur boost donne un bon rendement. Le stack doit alors fournir une tension de $\frac{100}{2}=50v$, au point de puissance nominale. Afin de maintenir un bon rendement de la PAC il ne faut pas descendre en dessous de 0.64 V par cellule et 0.6 A/cm². On trouve alors le nombre de cellules :

$$\frac{50}{0.64} = 78.125v$$

Pour déterminer la surface active de la PAC, on part sur la base d'une puissance égale à 120% de la puissance nominale, soit environ une centaine de kW.

$$(1 + 0.2) \times P_{nom} = 700 \text{ W}$$

Les 20% supplémentaires correspondent à la consommation des auxiliaires. Le courant vaut alors :

$$\frac{700w}{78.125v} = 8.96A$$

Et on déduit la surface active :

$$\frac{8.96 A}{0.65} = 465 \text{ cm}^2$$

Paramètre physique	description	valeurs
A	Surface active de la pile	16 cm ²
I	Epaisseur de la membrane	280μm
T	Température opératoire absolue de la pile	298.15 K
P _{anode}	Pression partielle de l'hydrogène	0.01atm
P _{cathode}	Pression partielle de l'oxygène	0.02atm
R _c	Résistance équivalent de contact à la conduction des électrons	0.0003 ohm
B	Constante empirique qui dépende du type de pile et son fonctionnement	0.016V
ε ₁	Coefficients paramétrique pour chaque modèle de la pile	0.9514
ε ₂	//	3.12*10 ⁻³
ε ₃	//	1.96*10 ⁻⁴
ε ₄	//	1.87*10 ⁻⁴
∂ H ₂ O/SO ₃ ⁻	Teneur de l'eau dans la membrane	14mol H ₂ O/molSO ₃
J _{max}	Densité de courant maximal	0.04934375 A/cm ²

Tableau II.4: principales caractéristiques de la PAC choisi

II.1.5 Dimensionnement des cellules photovoltaïque :

Le générateur PV utilisé est constitué de 2 packs de cellules de 300 W, dont les caractéristiques sont :

- Une puissance typique : 600 W.
- Tension à la puissance typique : 108V.
- Intensité à la puissance typique : 5.56 A.
- Surface des cellules solaire : 0.55 Cm²

SEMI-FLEXIBLE SOLAR PANEL



Description:

- Water-proof, perfect to use on yacht, car, boat, snow mobile, golf-cart... etc.
- Light weight for easy carrying
- High efficiency crystalline solar cell.

Semi Flexible

- bending angle up to 30 degrees
- Water-proof, perfect to use on yacht, car, boat, snow mobile, golf-cart... etc.
- Light weight for easy carrying

E-mail us for details

- Please email us and give us your ideas -our team will track carefully

Standard test condition

- test each module at
- 1000W/m² , AM 1.5, 25°C
- before packing



Certification

- Rigorous quality control meeting.
- The high international standards: CE, TUV, IEC, CQC and ISO9001:2008.

Spécification technique

puissance maximale tension:	18.0 ± 3 V
courant puissance maximale:	5.56A
circuit ouvert voltag V	20 V
court-circuit actuel Un	6.1A
taille de module (large et haute)	1050mm * 540mm * 2mm
nombre de cellules	32 PCS
taille de cellules (large et haute)	125mm * 125mm, monocristallin
poids par pièce kg	1.5KG5
coefficient de température de Isc	± 05% °C
coefficient de température de Voc	-0.33% °C
température coefficient de puissance)	-0.23% °C
NOCT (nominale température de fonctionnement cellulaire)	45 °C (±°C)

Figure II.7 : model de cellules photovoltaïques choisies [18]

Détermination des paramètres du modèle photovoltaïque :

Les paramètres suivants ont été obtenus par résolution numérique sous Matlabsimulink :

P_1	P_2	P_3	P_4	A	R_{sh}	R_s
0 .00345	0 .58 10 ⁻⁵	-0 .336 10 ⁻⁵	31.2367	1	0.614	151.16

II.1.6 Dimensionnement des super condensateurs :

Les super condensateurs constituent une source d'énergie auxiliaire qui intervient pendant les accélérations et lors du freinage du véhicule. On utilise un super condensateur de 48V d'une capacité de 165F.



Figure II.8 : Caractéristiques du super condensateur choisi [10]

II.2 Les hacheurs

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

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

II.2.1 Convertisseur Boost (élévateur de tension) [11] :

Un convertisseur Boost, ou hacheur parallèle, est une alimentation à découpage représenté sur la figure 29 qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus forte valeur.

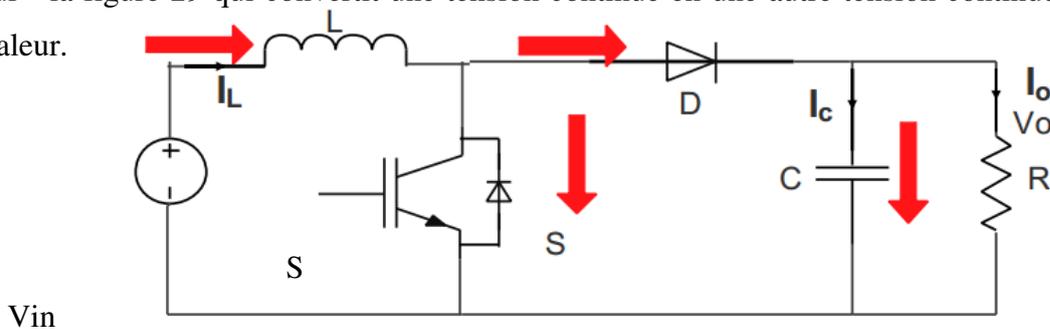


Figure II.9 : Architecture d'un convertisseur Boost idéal

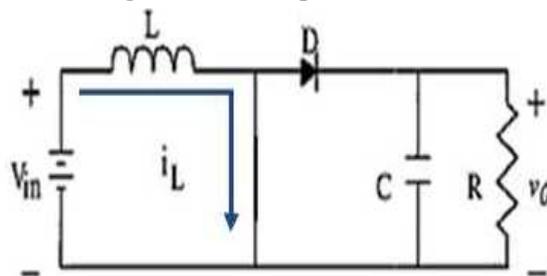
On suppose les hypothèses suivantes : Les composants sont idéals et sans perte, grâce à l'hypothèse idéale, $V_c = V_o$,

donc On écrit les équations d'état en CCM pour chaque intervalle de fonctionnement comme suite :

Interrupteur S fermé :

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

$$\begin{cases} L \frac{di_L}{dt} = V_{in} \\ C \frac{dV_0}{dt} = -\frac{V_0}{R} \end{cases} \quad (II.14)$$



FigureII.10 : convertisseur Boost S bloqué

Interrupteur S ouvert :

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

Les équations d'état en CCM sont :

$$\begin{cases} L \frac{di_L}{dt} = V_{in} - V_0 \\ C \frac{dV_0}{dt} = i_L - \frac{V_0}{R} \end{cases} \quad (II.15)$$

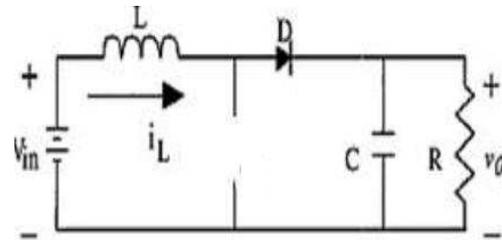


Figure II.11 : convertisseur Boost S ouvert

Les équations d'état pour le cycle de commutation :

$$\begin{cases} L \frac{di_L}{dt} = V_{in} - (1 - d)V_0 \\ C \frac{dV_0}{dt} = (1 - d)i_L - \frac{V_0}{R} \end{cases} \quad (II.16)$$

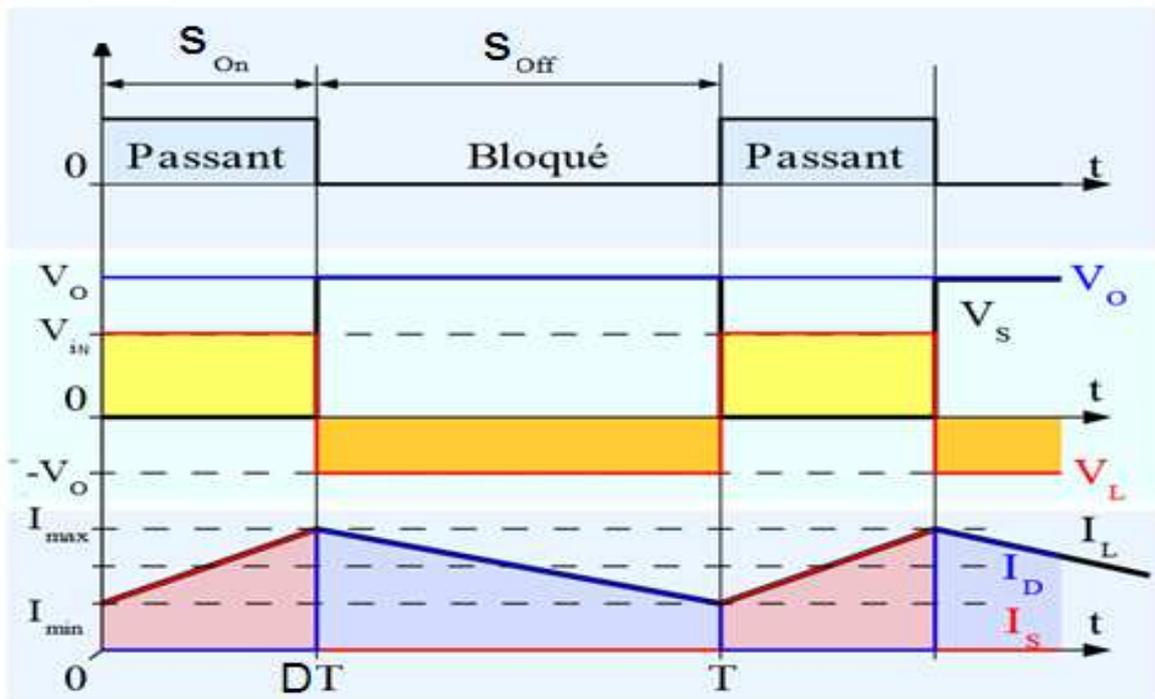


Figure II.12 : Formes d'ondes courant/tension dans un convertisseur Boost

II.2.1 Convertisseur buck-Boost:

Le hacheur série parallèle est un convertisseur indirect DC-DC. Son rôle principal est de convertir la tension constante d'entrée à une tension supérieure ou inférieure mais de polarité inverse. La source d'entrée est de type tension continue montée en parallèle avec un condensateur et une charge résistive figure 33.

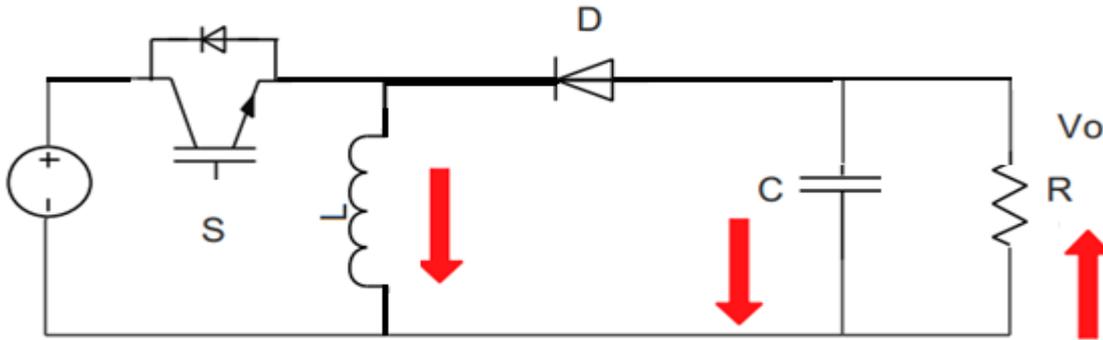


Figure II.13 : Architecture d'un convertisseur Buck-boost idéal

Interrupteur S ouvert:

Dans l'état passant, l'interrupteur S figure 34 est fermé, conduisant ainsi à une augmentation de l'énergie stockée dans l'inductance L.

$$\begin{cases} L \frac{di_L}{dt} = V_{in} \\ C \frac{dV_0}{dt} = i_L - \frac{V_0}{R} \end{cases} \quad (II.17)$$

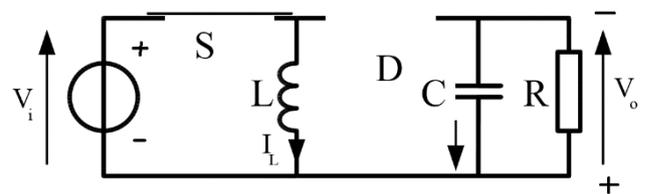


Figure II.14: convertisseur buck-boost S ouvert

Interrupteur S fermé :

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

Les équations d'état en CCM sont :

$$\begin{cases} L \frac{di_L}{dt} = V_0 \\ C \frac{dV_0}{dt} = i_L - \frac{V_0}{R} \end{cases} \quad (II.18)$$

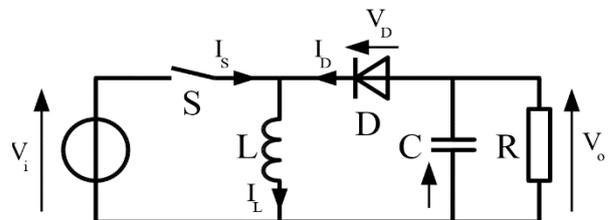


Figure II.15 convertisseurs buck-boost S fermé

Les équations d'état pour le cycle de commutation :

$$\begin{cases} L \frac{di_L}{dt} = DV_{in} + (1-d)V_C \\ C \frac{dV_0}{dt} = (1-d)i_L - \frac{V_0}{R} \end{cases} \quad (II.19)$$

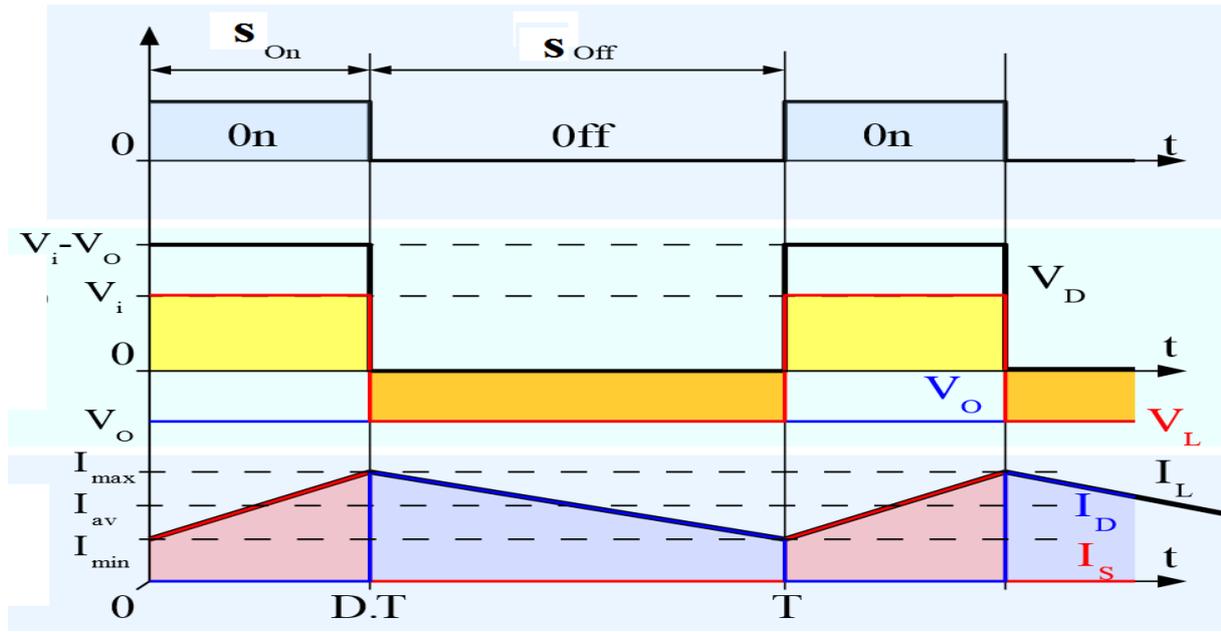


Figure II.16 : Formes d'ondes courant/tension dans un convertisseur Buck-Boost

II.2.3 Architecture du système hybride

Dans notre système hybride il est préférable de mettre un dispositif élévateur de tension associée (convertisseur Boost) au panneau photovoltaïque et la pile à combustible, et le convertisseur Buck-Boos associés au super-condensateur pour la recharger et aussi pour récupérer l'énergie lors de freinage figure 37.

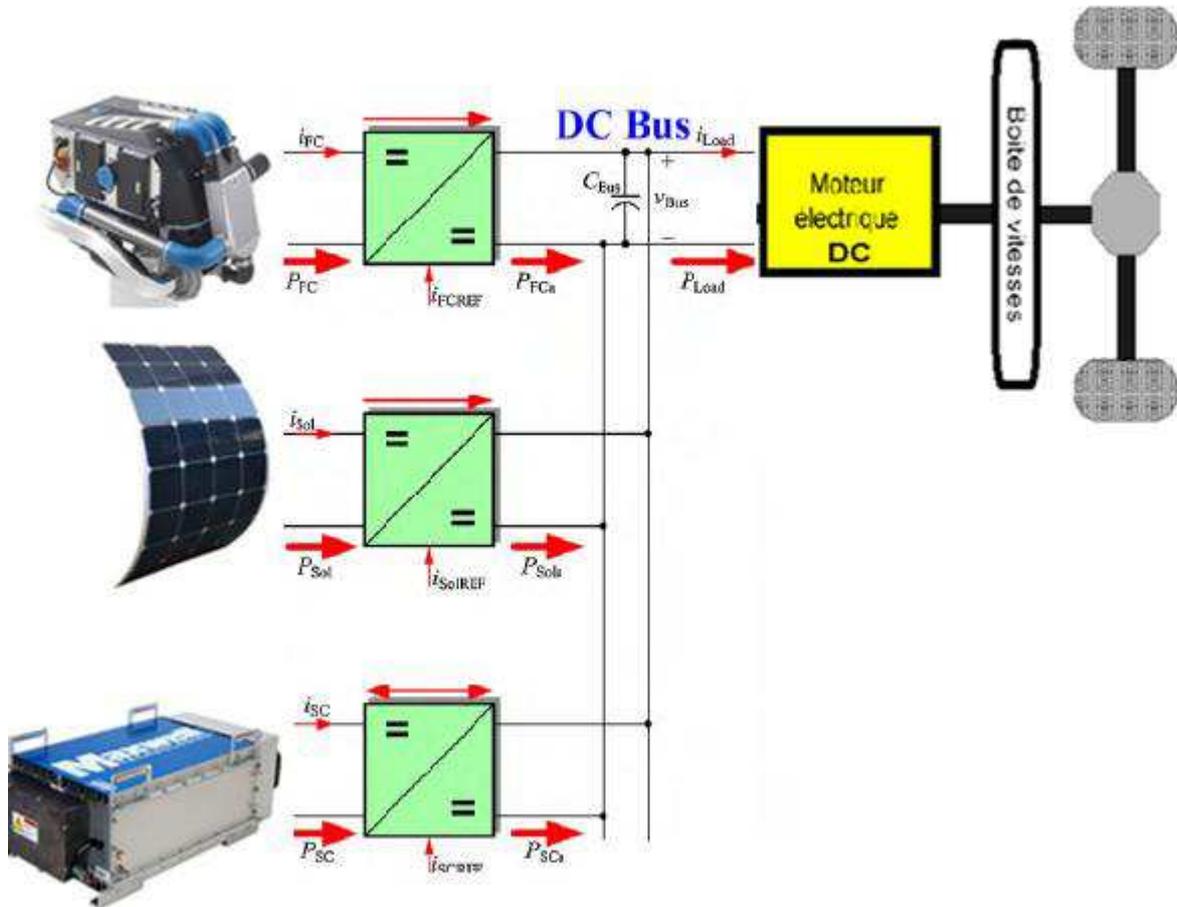


Figure II.17 : Architecture du système hybride

II.2.4 Modèle mathématique du système hybride :

Le modèle mathématique des convertisseurs Boost et Buck-Boost associés au panneau photovoltaïque, pile à combustible, et le super-condensateur, ainsi que le modèle du bus continu sont donnés dans l'équation suivante [24] :

Les équations modélisant le convertisseur Buck-Boost associé au super-condensateur par modèle moyen :

$$\begin{cases} L_{SC} \frac{d I_{SC}}{dt} = V_{SC} - (1 - U_{SC})V_{bus} - r_{sc} I_{SC} \\ C_{SC} \frac{dV_{SC}}{dt} = -I_{SC} \end{cases} \quad (II.20)$$

Les équations modélisant le convertisseur Boost associé cellule solaire, pile à combustible par modèle moyen :

$$\begin{cases} L_{PV} \frac{d I_{PV}}{dt} = V_{PV} - (1 - U_{PV})V_{bus} - r_{PV} I_{PV} \\ I_{PV} = I_{LPV} \end{cases} \quad (II.22)$$

Les équations modélisant le convertisseur Boost associé à la pile à combustible par modèle moyen :

$$\begin{cases} L_{FC} \frac{d I_{FC}}{dt} = V_{FC} - (1 - U_{FC})V_{bus} - r_{FC} I_{FC} \\ I_{FC} = I_{LFC} \end{cases} \quad (II.23)$$

Le bus continu est modélisé par l'équation suivante:

$$C_{bus} \frac{d V_{bus}}{dt} = -I_{load} + (1 - U_{FC})I_{LFC} + (1 - U_{PV})I_{LPV} + (1 - U_{SC})I_{SC} \quad (II.24)$$

II. 3 Gestion de l'énergie

Ce système comporte trois sources d'énergie : la pile à combustible et des cellules solaires (Cs) et un super-condensateur (SC), Afin de déterminer la décision gestionnaire d'énergie pour maintenir l'état de charge de la source auxiliaire (SC), la méthode de gestion de l'énergie (la commande par platitude) sera principalement utilisé pour garantir la distribution de puissance entre les sources pendant le fonctionnement du véhicule.

Les deux objectifs visés dans cette approche sont

- 1) La minimisation de la consommation en hydrogène de la pile à combustible
- 2) Charge de la source auxiliaire (SC).

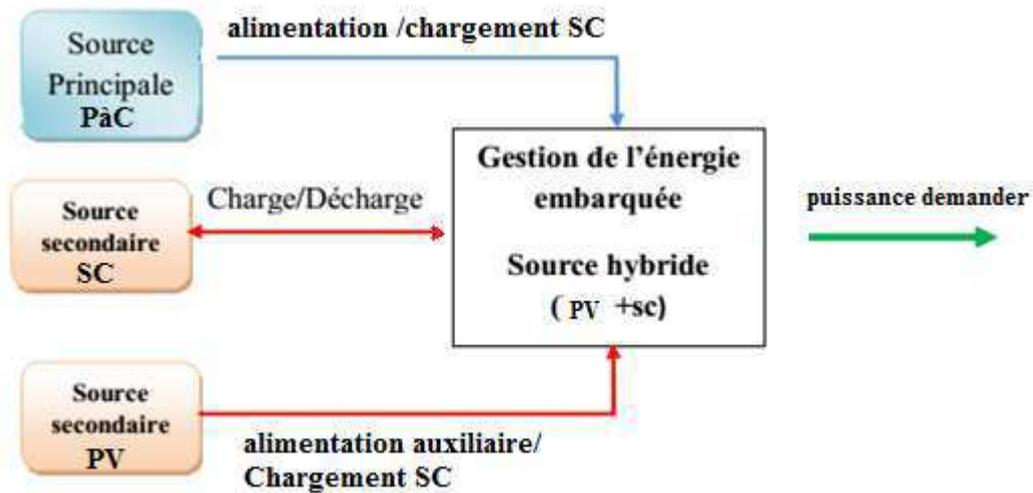


Figure II.18 : distribution d'énergie entre les sources d'énergie

II. 3.1 Définition d'un système plat :

Un système d'équations différentielles ordinaires est dit différentiellement plat s'il existées variables X , U et Y tels que :

$$\dot{X} = f(x, u)$$

$$x = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T \quad x \in R^n \quad (\text{II.25})$$

$$u = [u_1, u_2, \dots, u_m]^T \quad u \in R^m \quad (\text{II.26})$$

$$y = [y_1, y_2, \dots, y_r]^T \quad y \in R^r \quad (\text{II.27})$$

Avec x est le vecteur des variables aléatoires, u est celui de contrôle, y étant des sorties plates, et $(n, m) \in N^2$.

Les vecteurs x et u peuvent être exprimés en fonction du vecteur des sorties plates y et le nombre fini de ses dérivées comme suit :

$$X = \varphi(y, \dot{y}, \dots, y^{(r)}) \quad (\text{II.28})$$

$$U = \psi(y, \dot{y}, \dots, y^{(r+1)}) \quad (\text{II.29})$$

(r) est le nombre prédéterminé des dérivés.

Le vecteur des sorties plates y et ses dérivées offrent la représentation du système de telle sorte que si les profils de ces sorties plates sont connus, il est alors possible d'obtenir l'évolution de tous les variables d'état du système et les entrées correspondantes. L'avantage de l'approche de platitude différentielle est que les variables d'état et de contrôle du système, à savoir, x et u , sont carrément estimées par les trajectoires des sorties plates du vecteur y et ses dérivées sans avoir besoin à intégrer aucune équation différentielle [24].

II. 3.2 Contrôle de l'énergie des bus[24-25].

Basé sur le contrôle de l'énergie électrostatique Y_{bus} stocké dans le condensateur total C_{bus} de bus DC est considéré comme le variable de sortie

Donc

$$Y_{bus} = \frac{1}{2} C_{bus} V_{bus}^2 \quad (II.30)$$

$$Y_{busref} = \frac{1}{2} C_{bus} V_{busref}^2 \quad (II.31)$$

On suppose que le courant des super-condensateurs suit sa valeur de référence parfaitement.

Donc

$$i_{SC} = i_{SCREF} = \frac{P_{SC}}{V_{SC}} = \frac{P_{SCREF}}{V_{SCREF}} \quad (II.32)$$

$$i_{FC} = i_{FCREF} = \frac{P_{FC}}{V_{FC}} = \frac{P_{FCREF}}{V_{FCREF}} \quad (II.33)$$

$$i_{PV} = i_{PVREF} = \frac{P_{PV}}{V_{PV}} = \frac{P_{PVREF}}{V_{PVREF}} \quad (II.34)$$

En outre l'énergie stockée dans les super-condensateurs peut-être donnée par l'équation suivante :

$$Y_{sc} = \frac{1}{2} C_{sc} V_{sc}^2 \quad (II.35)$$

Par conséquent, l'énergie totale Y_{tot} électrostatique emmagasinée dans le condensateur de bus continue C_{bus} et dans le super-condensateur C_{sc} peut être écrite comme :

$$Y_{tot} = Y_{bus} + Y_{sc} = \frac{1}{2} C_{bus} V_{bus}^2 + \frac{1}{2} C_{sc} V_{sc}^2 \quad (II.36)$$

Comme le montre l'énergie capacitive de bus continue Y_{bus} peut être décrite en utilisant P_{PVREF} , P_{FCREF} , P_{SCREF} et P_{CH} par une équation différentielle :

$$\dot{Y} = P_{FCREF} + P_{PVREF} + P_{SCREF} - P_{CH} \quad (II.37)$$

Où

$$P_{FCREF} = P_{FC} - r_{FC} \left(\frac{P_{FC}}{v_{fc}} \right)^2 \quad (II.38)$$

$$P_{PVREF} = P_{PV} - r_{PV} \left(\frac{P_{PV}}{v_{PV}} \right)^2 \quad (\text{II.39})$$

$$P_{SCREF} = P_{SC} - r_{SC} \left(\frac{P_{SC}}{v_{SC}} \right)^2 \quad (\text{II.40})$$

$$P_{SCmax} = \frac{v_{SC}}{4r_{SC}} \quad (\text{II.41})$$

r_{FC} est la résistance série totale équivalente dans le convertisseur de pile à combustible.

r_{pv} est le total résistance en série équivalente dans le convertisseur de cellules solaires

r_{sc} est le résistance en série équivalente totale dans le convertisseur de super-condensateur

La puissance demandée par la charge peut être exprimée par l'équation suivante :

$$P_{CH} = v_{bus} i_{CH} = \sqrt{\frac{2y_{bus}}{C_{bus}}} i_{CH} \quad (\text{II.42})$$

De plus, la puissance délivrée à partir des super-condensateurs peut être donnée par L'équation :

$$P_{SC} = \sqrt{\frac{2y_{sc}}{C_{sc}}} i_{sc} \quad (\text{II.43})$$

Par conséquent, la variable d'état v_{bus} peut être mise sous une forme similaire à celle de l'équation :

$$v_{bus} = \sqrt{\frac{2y_{bus}}{C_{bus}}} i_{sc} = \Phi_1(y) \quad (\text{II.44})$$

La loi de contrôle de second ordre:

$$(\dot{y}_{bus} - \dot{y}_{busREF}) + K_{11}(y_{bus} - y_{busREF}) + K_{12} \int_0^t (y_{bus} - y_{busREF}) dt = 0 \quad (\text{II.45})$$

Et K_{11} et K_{12} sont les paramètres du contrôleur.

$$e_{ybus} = y_{bus} - y_{busREF} \quad (\text{II.46})$$

$$\ddot{e}_{ybus} + 2\zeta\omega_n \dot{e}_{ybus} + \omega_n^2 e_{ybus} \quad (\text{II.47})$$

Donc

$$K_{11} = 2\zeta\omega_n$$

$$K_{12} = \omega_n^2$$

Où ζ et ω_n sont respectivement le coefficient d'amortissement et pulsation naturel .

II. 3.3 résultat de la simulation et interprétations :

Le modèle est testé sur un cycle de 4 secondes pendant le fonctionnement selon un profil de charge représente une accélération et un freinage les différentes allures qu'on a obtenu pour l'analyse sont comme suite :

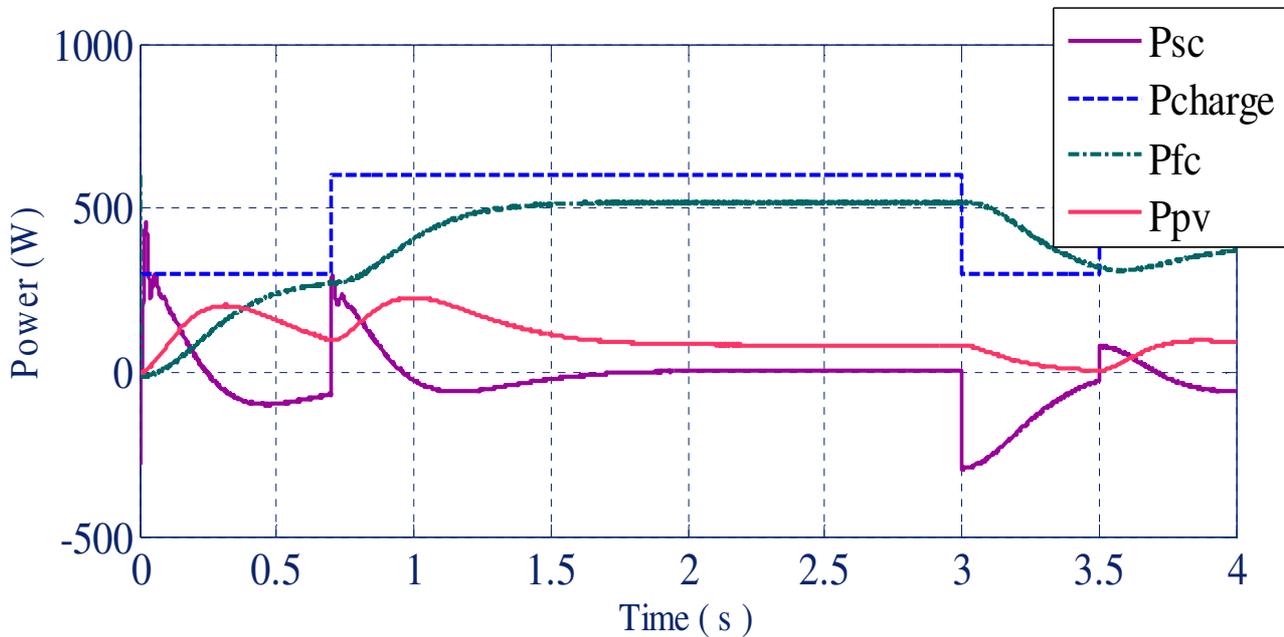


Figure II.20 : le bilan énergétique de tout le système hybride

La Figure 40 montre le bilan énergétique de tout le système hybride, on a choisi un profil de charge qui va nous permettre de voir le fonctionnement de système à savoir la traction, le freinage, et mode stable, qui sont en forme

- Une demande de puissance de l'ordre de 300W au démarrage du système hybride par le point $t=0s$.
- A $t=0,7s$, une augmentation de la puissance demandée vers une valeur de 600W, (accroissement avec un pourcentage égale à 100% de la charge demandée).
- A $t=3s$, une diminution de la puissance demandée vers une valeur de 300W, (décroissement avec un pourcentage égale à 100% de la charge demandée).
- A $t=3.5s$, une augmentation de la puissance demandée vers 400W (accroissement avec un pourcentage égale à 30% de la charge demandée).

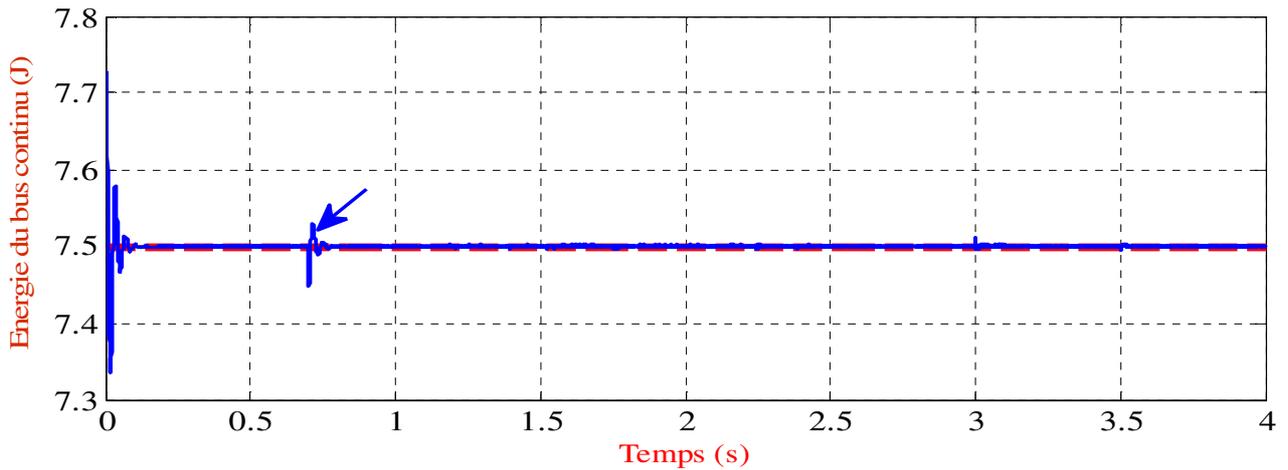


Figure II.21 : l'énergie de bus continu de système hybride

En figure II.21 on observe que l'énergie du bus continu traque sa référence, on déduit que la commande par platitude donne une bonne performance dynamique lors de la variation de la charge avec une marge d'erreur statique trop étroite pour une tension de sortie.

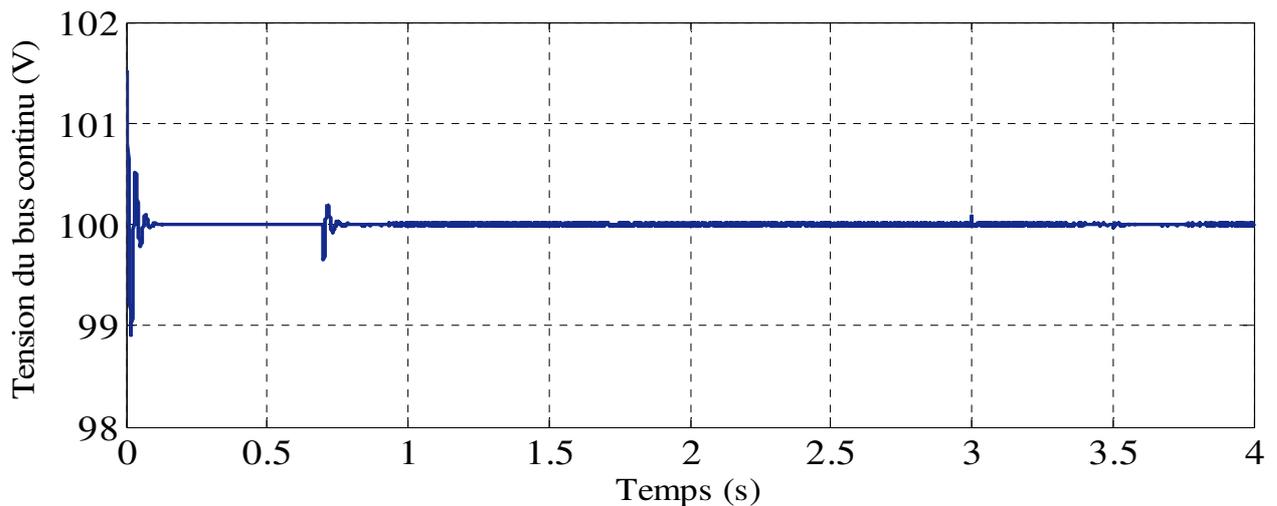


Figure II.22 : tension de bus continu de système hybride

La figure II.22 illustre la tension du bus continu réglée à 100V. Nous examinerons le système avec une première variation positive de la charge, à partir de 300 à 600W, et une deuxième variation négative de 600 à 300 W et une troisième variation positive de 300 à 400 W. Cette figure également, montre le bon comportement de la tension de sortie ajusté à la tension désiré (100V) pour une réponse transitoire obtenue, pendant trois changements importants de la charge, avec échelon positif et négatif. Nous analyserons une bonne traque de la référence de tension, par conséquent, la tension de sortie suit la référence de tension avec une erreur statique maximale ne dépassant pas les 0.020% (0.025V).

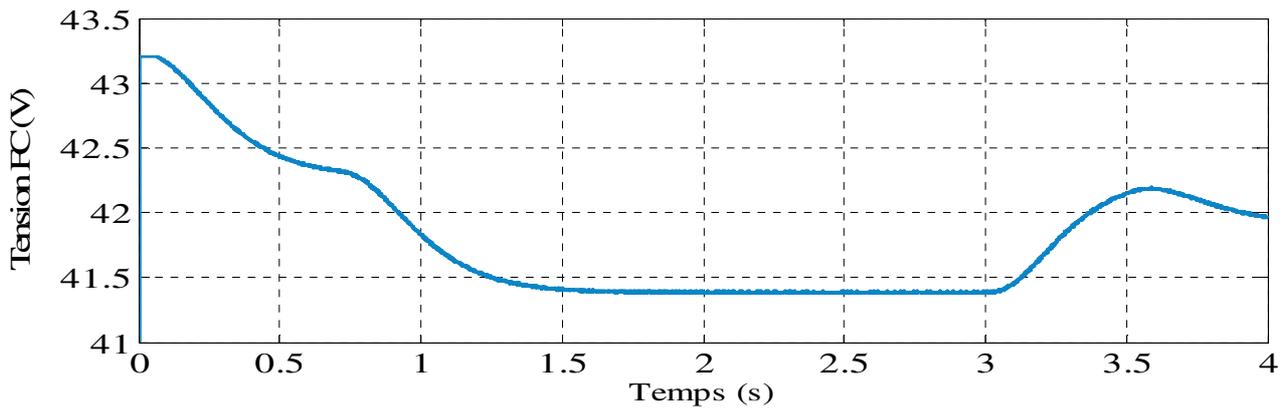


Figure II.23 : Tension de la pile à combustible

La figure II.23 révèle le comportement de la source principale (la pile à combustible), il commence à produire son énergie au démarrage du système avec une dynamique relativement lente dus à la conception de la pile à combustible.

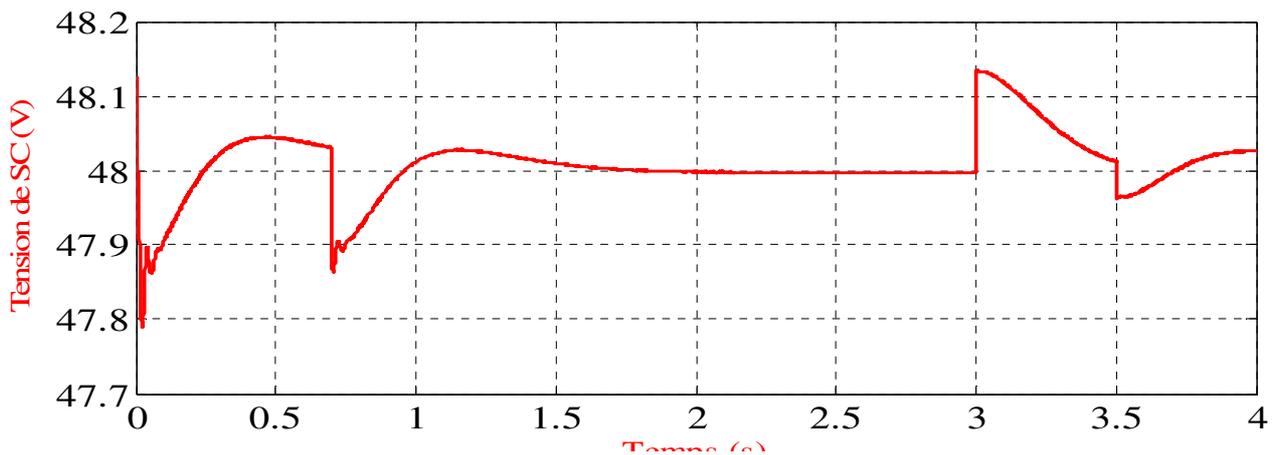


Figure II.24 : Tension du super-condensateur

La figure II.24 dévoile le procédé de reproduction de puissance via le système "supercondensateurs" pendant le temps de simulation et durant les fortes variations de charge discutées précédemment. Dans notre système hybride, les supercondensateurs ont deux rôles principaux, d'une part, ils sont utilisés comme une source de puissance pour des raisons de stockage, d'autre part, ils sont employés pour le réglage et l'ajustement de la tension de sortie au niveau du bus continu .

L'ajustement de la tension par les super-condensateurs se fait par:

- Une alimentation en puissance durant les pics de charge demandée.
- Une absorption de puissance aux instants de superflu engendrée lorsque la puissance fournit est supérieure à celle demandée par la charge.

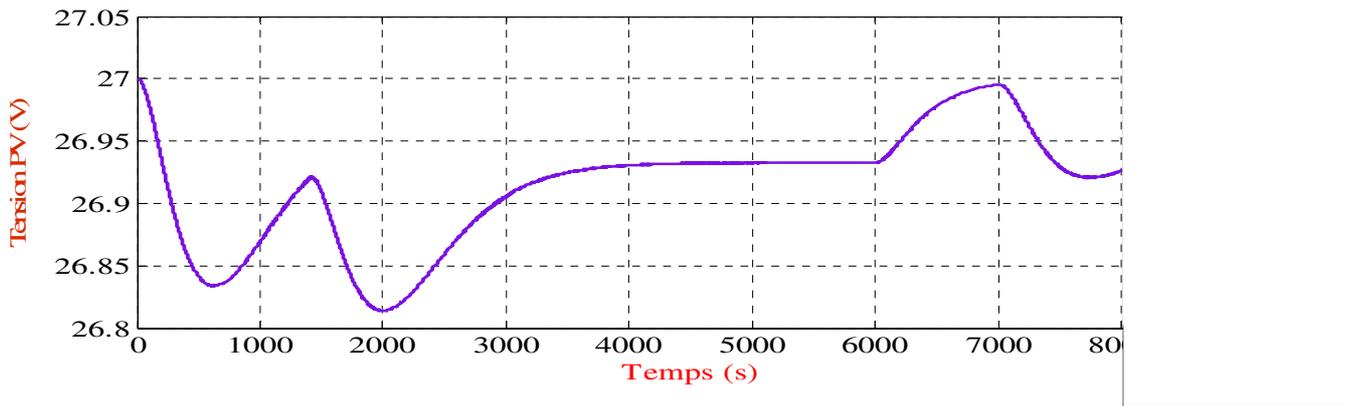


Figure II.25 : Tension Des cellules solaire

La figure II.25 montre la puissance produite par la source primaire (les cellules photovoltaïques). La puissance générée par la source PV dépend essentiellement du profil de l'éclairement et les signaux de commande du convertisseur Boost associé, en rapport avec l'algorithme MPPT. Où la puissance demandée par la commande plate sera comparée et examinée par rapport à la puissance calculée et demandée par le block MPPT, de sorte que, si la puissance PV référence conçue par la commande plate est supérieur à la puissance référence calculée par le block MPPT, l'algorithme de contrôle choisira alors, la puissance désignée par le block MPPT comme signale de référence. Dans l'autre cas, le convertisseur Boost sera commandé via la puissance demandée par le signal puissance provenant de la commande plate.

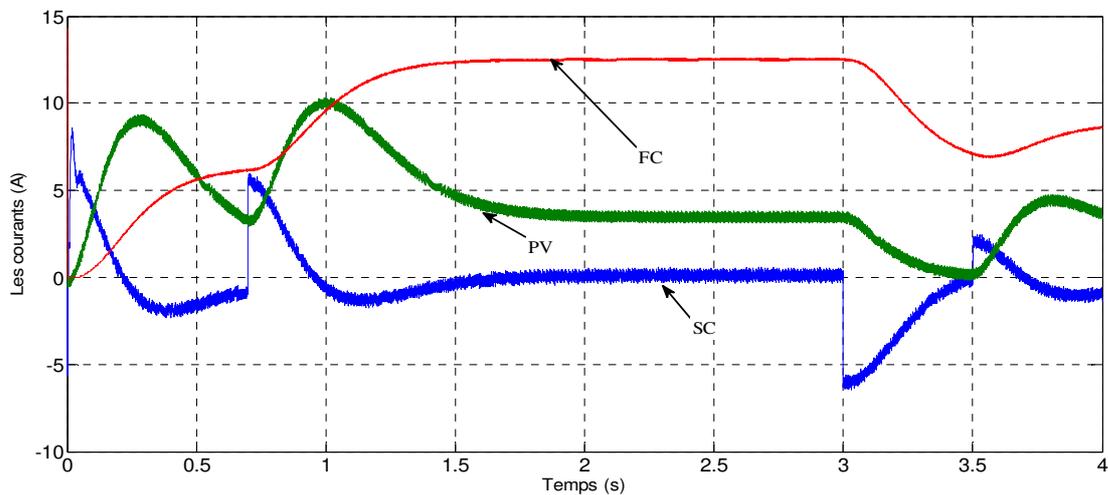


Figure II.26 : les courants de système hybride

La Figure II.26 montre les courants électriques de système hybride, qui indique la relation entre la demande de charge et l'augmentation de courant des trois sources d'énergies qui montre une compensation entre eux .

D'après les figures précédentes des puissances générées par les différentes sources employées, on constate que le système hybride atteint son objectif pour la régulation de tension de sortie avec une erreur statique très acceptable qui ne franchie pas les contraintes techniques imposées dans le cahier de charge, d'une part, et pour la gestion de l'énergie, d'autre part, dans laquelle on observe que la charge est complètement couverte à tout instant par l'énergie produite.

En plus, ces figures illustrent les modes de fonctionnement de base de la source hybride étudiée PV-FC-SC. L'état initial du système a une puissance de charge égale à 300W, et le dispositif de stockage de SC est complètement chargé, à savoir, VSC = 48V; par conséquent, la puissance des sources primaires, ainsi que les sources secondaires sont égales à zéro, et la puissance du SC est égale à 300W pour couvrir la puissance de charge demandée.

A $t=0,1s$, la commande plate dirigeait toutes les sources pour faire alimenter la charge, les figures montre le comportement lente de la pile à combustible et les celles solaire on remarque que le super-condensateur intervienne instantanément pour compenser la demande en puissance jusqu'à 450 W pourtant que la puissance demandé et de 300 W et cela pour donne une bonne traction lors de demande de l'énergie.

A $t = 0,7s$, la valeur de la charge passe de 300 W à 600W (selon le profil de charge figure 40), donc, la source SC commence à fournir sa puissance pour compenser la puissance des celles solaires et la PàC et couvrir la demande de charge, la commande plate orientera le système afin d'activer la source principale (FC) et la source socondaire PV qui à son tour va produire le nécessaire de puissance.

A $t=0.7$ au $t=3s$ on observe la participation des celles solaires avec la pile à combustible pour fournir l'énergie demandé et cela pour économisé la consommation d'hydrogene et profiter au maximum la source solaire.

A $t=3s$, une forte variation de charge avec un échelon négatif à une valeur constante de 300W a été provoquée, le SC, absorbe le superflu de la puissance durant l'instant transitoire. En même temps, on observe une diminution de l'énergie provenant de la source principale PàC et l'auxilliare PV afin d'équilibrer le rapport "demande et production" entre les sources et la charge ; ensuite, à

A $t=3.5s$ une autre perturbation de charge se crée (une augmentation de la puissance demandée jusqu'à 400W) la SC fournissent le manque de puissance en régime transitoire, la source auxiliaire PV est orientée pour fournir l'énergie nécessaire de charge, tandis que la puissance principale de PàC augment lentement pour prend en charge la totalité de charge demandé.

A partir l'analyse des résultats précédents, on constate que le système hybride avec plusieurs sources de production d'énergie et de production de puissance, forme un dispositif efficient pour les différentes valeurs de la charge demandée. La forte dynamique est garantie par l'utilisation de super-condensateurs, servant à compenser les perturbations de la puissance demandée pendant les régimes transitoires. Et en plus la sources PV sert à économisé la consommation d'hydrogen de la source pricipale.

Conclusion général :

Le principal objectif de ce mémoire était la gestion de puissance dans un étage hybride d'alimentation purement électrique constitué de deux sources : la principale qui est la pile combustible ; la secondaire formée d'un pack de super-condensateurs, pour une alimentation sans interruption et fiable, et une source auxiliaire constitué par des cellules solaires destinées à la recharge de la source de puissance (Sc) lors de l'arrêt et mieux économisé la consommation de l'hydrogène lors de la marche.

Ces sources sont connectées au bus continu par trois convertisseurs de puissance à courant continu, deux sont élévateur et le troisième un convertisseur réversible.

La gestion d'énergie est élaborée par rapport à la puissance demandée par le véhicule hybride et celle qui est disponible dans les trois sources d'énergie ; à savoir la pile à combustible en terme de source principale et les deux sources secondaire.

Les éléments constituant l'étage d'alimentation électrique (PàC,Cs,Sc) ont été modélisés et dimensionnés dans le but de constituer une étude homogène basée sur un exemple d'un cas réel présenter par un profil de charge.

Dans le dernier chapitre, nous avons modélisé et dimensionné les convertisseurs «Boost» et « Buck-Boost» associés aux différentes sources constituant notre système hybride. La commande par platitude appliquée par ses formules des signaux de contrôle et les contraintes techniques imposées ont été exposé. Dans ce travail. Les résultats de simulation ont montré une bonne performance de notre gestionnaire d'énergie avec une erreur statique au niveau de la tension de sortie du bus continu, qui est régulé à 100V, ne dépassait pas le 0.02%. L'implémentions sous l'environnement de Matlab/Simulink avec plusieurs scénarios nous a permis d'examiner et étudier le comportement et la performance de notre gestionnaire qui a pour objectif de gérer le flux de puissance générée par le système hybride. Ces résultats aussi ont montré que notre approche établie sur la notion de platitude se contrôle de manière très robuste, avec laquelle, nous testions le système sous de fortes variations de charge échelonnées négativement et positivement.

Perspectives

En perspectives, nous envisageons d'élargir ces travaux, dans le but d'améliorer davantage le fonctionnement du véhicule électrique, nous proposons de :

- Travailler sur un modèle dynamique du système PàC, c'est à dire avoir un modèle d'une pile à combustible qui prend en considération la consommation d'hydrogène.
- Optimiser au mieux le système en présentant d'autres stratégies de commande qui sont plus compliquées mais qui donnent des résultats plus performantes
- Indiquer les différentes contraintes, la consommation en hydrogène, le coût de fabrication, pour mieux dimensionner le système.
- Associer ce system avec une source de stockage, des batteries en Lithium-Ion pour profite au maximum l'énergie solaire et augmenter l'autonomie de véhicule hybride.
- L'utilisation des cellules solaire à couche mince avec un rendement élevé.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] P.Schotta ,J.Philippe ,P .Baurensa, «Modelisation et simulation de la source d'energie a pile a combustible du vehicule hydro-ge» ,2002.
- [2] H. Oman, « Fuel cells for personal electricity ». Aerospace and Electronic Systems Magazine, IEEE, vol. 15, n° 9, septembre 2000.
- [3] P. Stevens, F. Novel-Cattin, A. Hammou, C. Lamy, M. Cassir, « piles à combustible ». Technique de l'Ingénieur, D 3 340-1/28 2000.
- [4] Sylvaine.P Pile A Combustible Stationnaire : Contexte Réglementaire Et Normatif International Et Nationa 2017
- [5] E. Santi, D. Franzoni, A. Monti, D. Patterson, F. Ponci, N. Barry, « A fuel cell based domestic uninterruptible power supply ». Applied Power Electronics Conference, APEC'02, 2002, vol.
- [6] Fuel Cell Handbook EG&G Technical Services, Inc., 6ème édition, novembre 2002.
- [7] site web www.toyota.com.cn/innovation/environmental_technology/fuelcell_vehicle.
- [8] Toufik AZIB, Olivier BETHOUX, Ghislain REMY, Claude MARCHAND, Eric BERTHELOT «Système hybride à pile à combustible et super condensateur : structures, contrôle commande et gestion d'énergie» 2011.
- [9] Gianni Sartorelli, Adrian Schneuwly, Juergen Auer «Technologies et applications des supercondensateurs Colloque Énergie électrique« : besoins, enjeux, technologies et applications» UTBM, 2004.
- [10] H. BEN AHMED, B. MULTON, N. BERNARD, C. KERZREHO, « Le stockage inertiel électromécanique», 2007.
- [11] H. Gualous, R. Gallay, A. Berthon «Utilisation des super-condensateurs pour le stockage de l'énergie embarquée : applications transport, Maxwell Technologies» S. A janvier 2004.
- [12] G Alcicek «Contribution à l'étude du vieillissement et à l'intégration des super-condensateurs dans une chaîne de propulsion électrique (CPE) haute tension pour des applications véhicule électrique» 2014.
- [13] web site : data-sheet des Fabricants de super-condensateurs actuels.

- [14] : R. MAOUEDJ « application de l'énergie photovoltaïque au pompage hydraulique sur les sites Tlemcen et de Bouzareah ». Mémoire de magister, université de Tlemcen, 2005.
- [15] : B. Flèche, D. Delagnes « Approche générale Energie solaire photovoltaïque» /juin 2007.
- [16] : Stéphan Astier, « Conversion photovoltaïque : du rayonnement solaire à la cellule ». Technique de l'ingénieur 2012.
- [17] : site web www.hallou-solaire.com.
- [18] : [www .hybridlife.org/toyota-devoile-toit-panneau-solaire-de-prius-4-rechargeable](http://www.hybridlife.org/toyota-devoile-toit-panneau-solaire-de-prius-4-rechargeable) .
- [19] : M. Belatel , F.Z. Aissous et F. Ferhat «Contribution à l'étude d'une pile à combustible de type PEMFC utilisée pour la production d'énergie électrique verte Revue des Energies Renouvelables» 2012.
- [20] : Philip Tritschler « Optimisation de l'architecture électrique et gestion d'énergie pour un système a pile a combustible embarquée dédiée a l'application agricole» thèse de doctorat ,2010.
- [21] G. Fontès, « Modélisation et caractérisation de la pile PEM pour l'étude des interactions avec les convertisseurs statiques », thèse de doctorat, institut national polytechnique de Toulouse, septembre 2005.
- [22] F. Belhachemi, « Modélisation et caractérisation des super-condensateurs à couche Double électrique utilisés en électronique de puissance», Thèse, 2001.
- [23] F. Belhachemi, S. Raël, B. Davat, «Supercapacitors electrical behaviour for power electronics applications», 9th International Conference and Exhibition on Power Electronics and Motion Control , 2000.
- [24] Dr.Ilyes Tegani, «Optimisation et contrôle d'un micro smart grid utilisant une pile à combustible, des supercondensateurs, des batteries, une éolienne et une source photovoltaïque», Thèse doctorat ,2016.
- [25] Phatiphat Thounthong, «Energy management of fuel cell/solar cell/supercapacitor hybrid power source», 2010.