



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

MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies
Électrotechnique
Réseau électrique

Réf. :

Présenté et soutenu par :

LEKBIR KHATIB

Le : lundi 8 juillet 2019

Commande et gestion d'énergie d'une source hybride(PAC et SC)

Jury :

.Dr	Rezig mohamed	MCA	Université d'appartenance	Président
Dr	Tkouti Nacira	MCA	Université d'appartenance	Examineur
Dr	Saadi ramzi	MCA	Université d'appartenance	Rapporteur

Année universitaire : **2018 - 2019**

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique
Filière: Electrotechnique
Option: Réseauxélectrique

Mémoire de Fin d'Etudes
En vue de l'obtention du diplôme:

MASTER

Thème

**Commande et gestion d'énergie d'une source hybrid
(PAC et SC)**

Présenté par :

LEKBIR KHATIB

Avis favorable de l'encadreur :

Dr. SAADIRAMZI

Avis favorable du Président du Jur

Cachet et signature

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique
Filière: Electrotechnique
Option: Réseaux électrique

Thème :

Commande et gestion d'énergie d'une source hybride

(PAC et SC)

Proposé et Dirigé par : **Dr. SAADIRAMZI**

RESUMES (Français et Arabe)

Résumé:

Ce mémoire propose une stratégie de contrôle pour piloter une source hybride composée d'une pile à combustible comme source primaire et banc de super-capacité qui joue le rôle d'une source secondaire de stockage. Les deux sources d'énergie sont connectées au bus continu via deux convertisseurs DC/DC : BOOST et BACK-BOOST. On utilise dans ce travail au lieu un moteur électrique une charge R-L pour tester notre système hybride. La commande utilisée est basée sur la notion de platitude pour le convertisseur associé avec la pile à combustible et commande basé sur le mode glissant pour le convertisseur connecté avec le banc de super-capacité. Les résultats de simulation présentent les hautes performances de la commande utilise .

- **Mots clés** : pile à combustible, super-condensateur, convertisseur, système hybride .

- تلخيص

تقتراح هذه الأطروحة استراتيجية للتحكم في مصدر هجين يتكون من خلية وقود كمصدر أولي ومكثف فائق السعة تعمل كمصدر تخزين ثانوي. يتم توصيل كلا مصادر الطاقة إلى ناقل عبر محولين DC / DC: BOOST و BACK-BOOST. BOOST. نستخدم في هذا العمل بدلا من محرك كهربائيًا حمولة R-L لاختبار نظامنا الهجين. يعتمد على مفهوم التسطیح للمحول المرتبط بخلية الوقود والتحكم استنادًا إلى وضع الانزلاق للمحول المتصل بمكثف ذات قدرة فائقة. تظهر نتائج المحاكاة الأداء العالي لنظام التحكم المستخدم .

- الكلمات الرئيسية: خلية الوقود ، مكثف فائقة ، محول ، نظام هجين.

Sommaire

Dédicace

Remerciment

Liste des figures

Liste des abréviations

Sommaire

Introduction générale P1

Chapitre I : généralité sur les piles à combustibles

I-1.Introduction P3

I-2.Principes de fonctionnement P3

I-3.Les différents types de piles à combustible P5

I-4.Les piles à combustible de type PEM P7

I-5.Hydrogène P7

I-6.Système pile à combustible PEM P8

I-7.Applications des piles à combustible..... p9

I-7.1.Applications portable p9

I-7.2.Application automobile..... P9

I-7.3.Application stationnaires P10

I-9.Avantages et inconvénients des piles à combustible de type PEM..... P10

I-9.1.Avantages P10

I-9.2 Inconvénients..... P11

I-10.Conclusion..... P11

Chapitre II : généralité sur les super condensateurs

II.1.Introduction P12

II.2.Super condensateur..... P12

II.3.Technologies des super condensateurs..... P13

II.3.1. Matériaux d'électrodes..... P13

II.3.1. Principaux constructeurs..... P14

II.4. Applications courantes des super condensateurs.....	P14
II.4.1 Stockeur d'énergie fixe	P14
II.4.2. Stockeur d'énergie embarqué.....	P16
II.5.Modélisation des supercondensateurs à couche double électrique	
Modèle énergétique à deux branches.....	P17
II.5.1.Modèle théorique.....	P19
II.6.Applications potentielles des supercondensateurs	P19
II.7.Informatique et telecommunication.....	P20
II.8. Les avantages.....	P20
II.9.Les inconvenient.....	P21
II.10.Conclusion.....	P21

**Chapitre III : commande de la source hybride : pile
à combustible/supercondensateur**

III.1.Introduction.....	P22
III.2.Source embarqué utilisant une Pile à combustible.....	P22
III.3.Modélisation du hacheursurvolteur.....	P22
III.4.Commande du hacheursurvolteur.....	P23
III.5.Boucle de régulation d'énergie de convertisseurBOOST.....	P23
III.5.1.Brèvedéfinition de la théorie de platitude.....	P24
III.6.Loide contrôle.....	P25
III.7.Planification de la trajectoirederéférence et régulation d'énergie.....	P26
III.8.Commande des convertisseurs DC-DC par mode glissant.....	P27
Modélisation de système.....	P28
Le schéma de simulation.....	P30
Les résultats de simulation.....	P32
III.9 .Interprétation des résultats.....	P34

III.11.Conclusion.....	P35
Conclusion générale.....	P36
Bibliographies	P37

Dédicace

- *Tout d'abords, je rends grâce à Allah pour toutes les bénédictions et
la grâce de la réussite*
- *A ma chère mère, pour ses scarifies de puis qu'elle m'a mise au monde.*
- *A mon cher père, qui m'a toujours soutenu et m'a aider à affronter les
Difficulté*
 - *A tous mes chers frères.*
- *A mes tantes et mes oncles et ma grand-mère et mon grand-père.*
 - *A tous ma famille*
 - *A tous mes amis.*

Remerciement

Louange à Allah qui nous a guidés à ceci. Nous n'aurions pas été guidés, si Allah nous avait pas guidés.

*Je tiens à exprimés mes plus grands vifs remerciements à mon encadreur monsieur **SAADI RAMZI** pour m'avoir dirigé tout au long de la réalisation de ce travail. Ses orientations, sa compréhension, et sa disponibilité constante m'ont été d'une précieuse aide. Je tiens à remercier également monsieur **Amrani Ishak** pour m'aider, pour l'encouragement et pour toute modestie, aussi madame **tkouti nacira** pour avoir accepté d'examiner mon travail merci beaucoup que dieu vous protège.*

Je remercie également tous les enseignants de département d'électrotechnique de l'université de Biskra qui ont participé à mon étude pendant tout le cycle universitaire.

Liste des figures

- Figure I.1 :** Principe des piles à combustible à électrolyte acide (en haut) ou alcalin (en bas)
- Figure I.2 :** Principe de fonctionnement d'une pile PEMFC
- Figure I.3.**Classification différents types de pile à combustible en fonction de la température
- Figure II.1 :** Principe de développement des super condensateurs
- Figure II.2 :** Pack de supercondensateurs dédié à la récupération de l'énergie lors du freinage
- Figure II. 2.3 :** Modèle énergétique à deux branches de R. Bonert et L. Zubieta
- Figure III.1 :** Schéma électrique du convertisseur
- Figure III.2 :** Génération de la trajectoire de référence
- Figure III.3.**Source hybride pile et super capa
- Figure III.4.**contrôle du convertisseur de la pile
- Figure III.5.**contrôle du convertisseur des supercondensateurs
- Figure III.6.**model de système sous MATLAB SIMULINK
- Figure III.7.** model de pile avec IBC sous MATLAB SIMULINK
- Figure III.8.** la commande de IBC sous MATLAB SIMULINK
- Figure III.9.**courant d'une phase d'IBC
- Figure.III.10.**courant de référence d'une phase d'IBC
- Figure.III.11.**tension de bus continu
- Figure.III.12.**courant de charge
- Figure.III.13.**tension de la charge
- Figure.III.14.**tension de la super capa
- Figure.III.15.**tension de la pile

Liste des abréviations

AME : Assemblage Membrane Electrodes

PEMFC : Proton Exchange Membranes Fuel Cell

DMFC : Direct Methanol Fuel Cell

PAFC : Phosphoric Acid Fuel Cell

AFC : Alkaline Fuel Cell

SOFC : Solid Oxide Fuel Cell

MCFC : Molten Carbonate Fuel Cell **E** : la tension théorique à vide

v_{oHm} : la surtension ohmique

v_{on} : la surtension de concentration

I_n : le courant intern

A : la pente de la droite de Tafel

R_m : la résistance totale de la pile à combustible

I : courant limite

B : constante de transport

C : capacité

ϵ : la permittivité du vide

ϵ : la permittivité relative du diélectrique

S : la surface de chaque électrode

X : le vecteur des variables aléatoires

U : le vecteur de contrôle

Y : le vecteur des sorties plates

h_1 : l'énergie électrostatique stockée dans le condensateur de BOOST

V_s : le variable d'état du système

P_1 : le contrôle variable

P_{fmax} : la puissance maximale d'entrée

h_{1ref} : la trajectoire de référence

h_1 : énergie stockée dans le IBC

Introduction générale

Les piles à combustible sont des générateurs d'électricité et de chaleur qui offrent une densité d'énergie élevée et qui représentent une alternative renouvelable et propre aux énergies fossiles (gaz naturel, charbon et pétrole). Néanmoins, l'état de développement de cette technologie ne permet pas à ce jour de concurrencer avantageusement les machines à combustion interne à cause de leur coût élevé et leur capacité de puissance électrique basse

Contrairement aux piles à combustible, l'électricité provenant des supercondensateurs n'est pas générée, mais stockée directement sous la forme d'un champ électrostatique, car ces dispositifs ne fonctionnent pas sur la base des réactions chimiques ; après, l'énergie est délivrée beaucoup plus rapidement que l'énergie des piles à combustible. Les super-condensateurs ont donc la capacité de produire une forte puissance électrique, mais offrent une densité d'énergie moins favorable que les piles à combustible.

La combinaison de haute densité d'énergie et de haute densité de puissance peut être obtenue avec un ensemble de pile à combustible-supercondensateur. L'hybridation d'un système d'alimentation de puissance électrique permet d'élargir le domaine d'opération, améliorer la réponse dynamique du système, ainsi que réduire le coût, étant donné que les sources sont dimensionnées en fonction de leur utilisation. Le fonctionnement efficace d'un système hybride de génération peut être assuré avec la mise en œuvre d'une stratégie de gestion de l'énergie. Cette stratégie doit en premier lieu, faire face à la distribution appropriée de la demande de puissance entre le générateur (pile à combustible) et l'accumulateur (supercondensateur) ; celle-ci doit également assurer un état de charge (SOC) convenable du module de supercondensateurs ; enfin, la stratégie de gestion doit comporter des lois de commande locale et garantir une tension constante.

Cette thèse s'inscrit dans le cadre de conception d'une stratégie de gestion de l'énergie dans un système hybride de génération d'énergie électrique composé d'une pile à combustible et une banque de supercondensateurs. La source hybride fournit une puissance maximale de 1,2 kW et sa conception implique des décisions concernant la sélection de l'architecture du système hybride ainsi que le choix de la topologie et le dimensionnement d'une unité de convertisseurs. La stratégie de gestion vise à satisfaire la demande d'énergie électrique de la charge et favoriser la consommation énergétique efficiente ; sa performance est évaluée en développant un simulateur qui comprend la dynamique des éléments mis en jeu : deux sources et l'unité de convertisseurs. Le générateur hybride est supposé alimenter un profil de consommation correspondant à un véhicule électrique, de ce fait un cycle standard de conduite en ville en petite échelle est demandé lors des simulations, ce qui permet d'évaluer la performance du générateur hybride et plus spécifiquement de la stratégie de gestion énergétique.

Dans une première étape, un simulateur intégral a été construit avec des bibliothèques de Simscape/Simulink. Le simulateur est constitué des modules contenant des modèles mathématiques qui prédisent le comportement des différents dispositifs constituant le système hybride. Le module de la pile à

combustible modèle la dynamique d'un système BAHIA® (400 W - 1100 W, 0 A - 70 A nominale) et le module de supercondensateur modèle les cycles charge-décharge d'une banque Maxwell de 400 F et 16 V. Un onduleur de tension pont complet avec convertisseur élévateur conditionne l'énergie délivrée par la pile à combustible et un convertisseur bidirectionnel (buck-boost) est connecté au module de supercondensateurs afin de conditionner les cycles de charge-décharge. L'unité des convertisseurs a été dimensionné, puis, un modèle moyen de petits signaux a été formulé afin de décrire la dynamique de ces dispositifs. Les différents composants ont été intégrés dans l'environnement Simulink. Dans une deuxième étape, la stratégie de gestion énergétique a été conçue en considérant les caractéristiques et performances des sources ; le résultat est une stratégie de trois niveaux hiérarchiques, dont l'aspect principal est la définition des lois de commande locales et globale. Dans une troisième étape, le système complet est évalué en termes du niveau d'utilisation des sources, du domaine d'opération de la pile à combustible, et de l'accomplissement des objectifs des commandes locales et global, qui engagent notamment l'état de charge des supercondensateurs et la régulation de la tension du générateur hybride.

Chapitre I

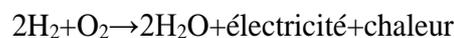
Pile à combustible

I.INTRODUCTION:

La croissance de la consommation énergétique accompagnée d'une augmentation de la concentration des gaz à effet de serre dans l'atmosphère ainsi que l'épuisement inéluctable des ressources fossiles attendues vers la fin de ce siècle sont à la base de l'orientation vers une source ou méthode de production d'énergie renouvelable et écologique (énergie solaire, énergie hydraulique, éolienne, géothermie...). Dans cet intérêt, l'application des piles à combustible s'étend sur plusieurs domaines stationnaires, portables et mobiles. Dans cette dernière catégorie, la pile à combustible est généralement associée à un élément de stockage de l'énergie électrique pour alimenter un moteur électrique dans une structure dite 'hybride' [1].

I.1.Principes defonctionnement:

Une pile à combustible est un dispositif de conversion d'énergie qui convertit l'énergie chimique directement en énergie électrique sans aucun processus thermique ou mécanique (figure 1.1). L'énergie est produite quand l'hydrogène réagit chimiquement avec l'oxygène de l'air. Dans un moteur à combustion interne, lorsque la réaction se produit, l'énergie est relâchée sous forme de chaleur, dont une partie peut effectuer un travail utile en poussant un piston .Dans [2].une pile à combustible, la réaction est électrochimique et produit de l'énergie électrique et de la chaleur. L'énergie électrique peut être employée pour effectuer le travail utile directement tandis que la chaleur est soit gaspillée soit employée parailleurs.



Une caractéristique fondamentale des piles à combustible est que la charge électrique détermine le taux de consommation d'hydrogène et d'oxygène. Les gaz sont fournis, à l'anode pour l'hydrogène et à la cathode pour l'oxygène. Ainsi, la structure d'une pile à combustible comporte des arrivées de gaz des deux côtés de l'électrolyte.

Les électrolytes peuvent être liquides ou solides, certains fonctionnent à haute température, d'autres à basse température. Les piles à combustible fonctionnant à bas

température tendent à exiger des catalyseurs en métal noble, typiquement du platine, destiné à améliorer les réactions aux électrodes. La plupart des piles à combustible destinées aux applications automobiles emploient un électrolyte solide à basse température qui conduit des ions d'hydrogène.

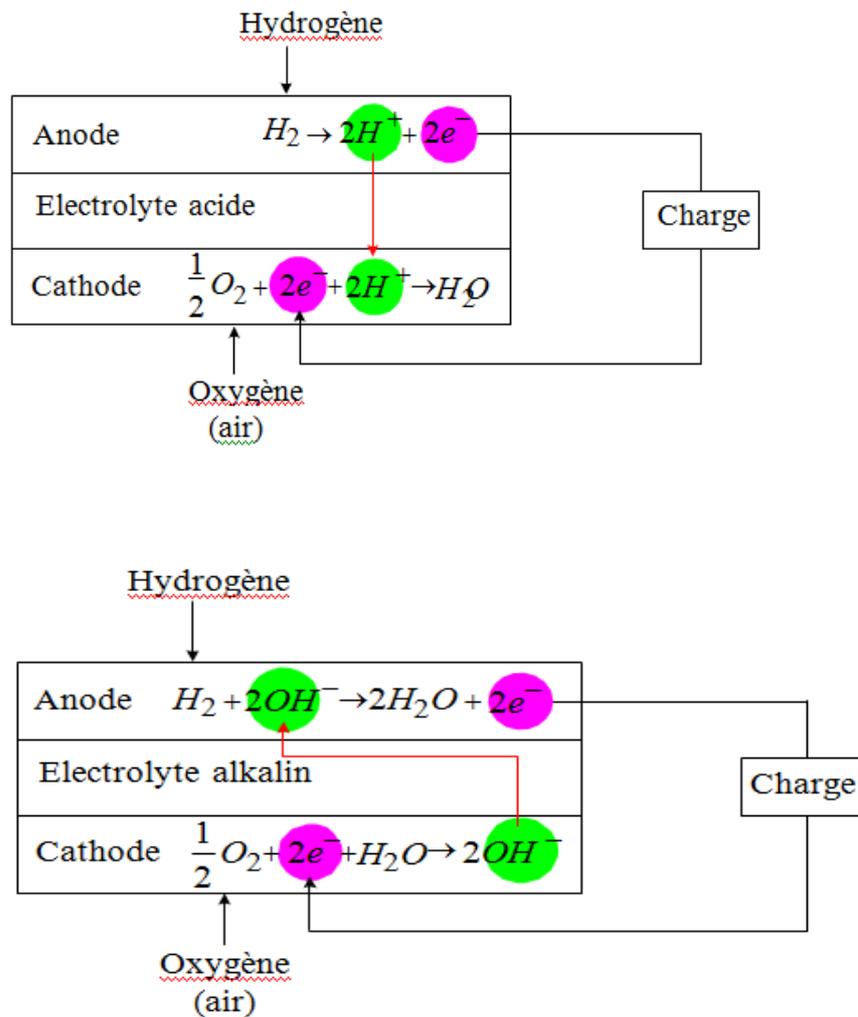


Figure I.1 : Principe des piles à combustible à électrolyte acide (en haut) ou alcalin (en bas) [3].

En principe, une pile à combustible peut fonctionner en utilisant une variété de carburants et d'oxydants. L'hydrogène a été reconnu comme le carburant le plus efficace parce qu'il a une plus haute réactivité électrochimique que les autres carburants, tels que les hydrocarbures ou les alcools. Et l'oxygène est l'oxydant par excellence en raison de sa haute réactivité et son abondance dans l'air.

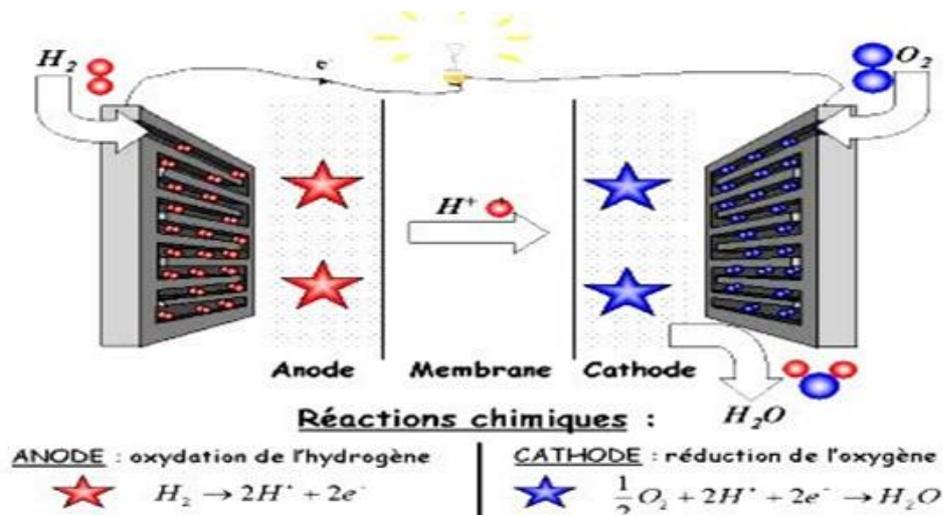


Figure I.2 : Principe de fonctionnement d'une pile PEMFC.

I .2.Les différents types de piles à combustible[4,5]

Il existe actuellement cinq technologies de piles à combustible classées selon la nature de leur électrolyte dont résulte leur température de fonctionnement, basse (<150°), moyenne (200°C), haute (650°C-1000°C).[161] Pile à membrane polymère échangeuse de protons, Proton Exchange Membrane Fuel Cell : PEMFC

- 1) Pile à acide phosphorique, Phosphoric Acid Fuel Cell :PAFC.
- 2) Pile à oxyde solide , Solid Oxide Fuel Cell:SOFC.
- 3) Pile à carbonate de fondu, Molten Caronate Fuel Cell :MCFC.
- 4) Pile alcaline,Alkaline Fuel Cell :AFC.
- 5) Pile alimentée directement par méthanol, Direct Methnol Fuel Cell

Table. 1 Différents types de pile à combustible (ion traversant l'électrolyte, température de fonctionnement et applications typiques [6].).

Types de pile à combustible	Ion	T° (°C)	Applications typiques
Pile à combustible alcaline (Alkaline Fuel Cell)	OH ⁻	50 200	Apollo, navettes spatiale
Pile à combustible à membrane (Proton Exchange Membrane Fuel Cell)	H ⁺	30 100	Véhicule, stationnaire
Piles à combustible au méthanol direct (Direct Methanol Fuel Cell)	H ⁺	20 90	Portable

Pile à combustible à acide phosphorique (Phosphoric Acid Fuel Cell)	H^+	220	Stationnaire
Pile à combustible à carbonate fondu (Molten Carbonate Fuel Cell)	CO_3^{2-}	650	Stationnaire
Pile à combustible à oxyde solide (Solid Oxide Fuel Cell)	O^2 -	500 1000	Stationnaire, système auxiliaire de puissance (Auxiliary Power Unit)

sont séparées par la membrane (20-200 micromètres) qui conduit les protons de l'anode à la cathode et qui est imperméable aux électrons. Cet écoulement de protons entraîne des molécules d'eau alors que le gradient de l'humidité mène à une diffusion de l'eau selon l'humidité locale de la membrane. Les molécules d'eau peuvent donc aller dans les deux directions à l'intérieur de la membrane selon le côté où les gaz sont humidifiés et selon la densité de courant qui est directement liée aux protons qui traversent la membrane et à l'eau produite du côté de la cathode. Les électrons, qui apparaissent du côté de l'anode, ne peuvent pas traverser la membrane et sont employés dans le circuit électrique externe avant leur retour à la cathode.

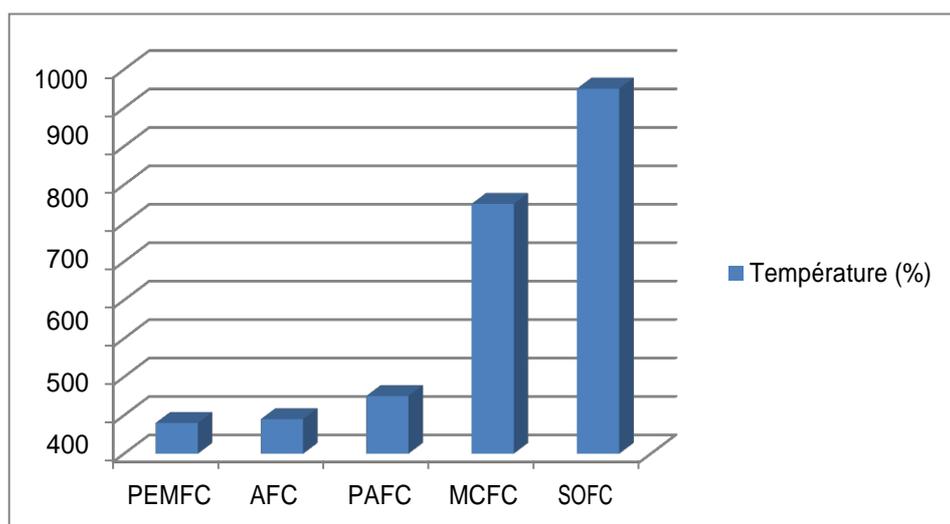


Fig I-3. Classification différents types de pile à combustible en fonction de la température.

I.3. Les piles à combustible de type PEM

Les piles de type PEM ont une densité de puissance élevée, un électrolyte solide, ainsi

qu'une faible corrosion. Par conséquent, ce type de piles est bien adapté pour les applications de transport, étant donné le rendement élevé de la pile à combustible en charge partiel. Ceci correspond à la majorité des scénarios de conduite, tant urbains que périurbains. Le travail présenté dans ce mémoire s'intéresse uniquement à ce type de piles à combustible.

I-4.Hydrogène :

L'élément le plus abondant dans l'univers c'est l'hydrogène (H), Il compose 75% de la masse de toute la matière dans les étoiles et les galaxies. Un atome d'hydrogène a seulement un proton et un électron. Cependant l'hydrogène comme gaz (H₂) n'existe pas naturellement sur terre et se présente sous formes composées. Combiné avec l'oxygène, c'est l'eau (H₂O).

Combiné avec le carbone, il forme les composés organiques tels que le méthane (CH₄), le charbon ou le pétrole. Aujourd'hui, la plupart de l'énergie que nous utilisons vient des carburants fossiles. Seulement sept pour cent viennent des sources d'énergie renouvelable.

Dans une optique de raréfaction des carburants fossiles, l'hydrogène apparaît comme un vecteur énergétique prometteur. Puisque le gaz d'hydrogène n'existe pas naturellement sur terre, il faut le produire.

Il y a plusieurs méthodes de faire cela. Si l'hydrogène est produit à partir de l'électrolyse de l'eau, l'électrolyseur étant alimenté à partir d'une source d'énergie renouvelable (panneau solaire, éolienne ou turbine hydroélectrique), il n'y aura pas d'émissions de dioxyde de carbone. Le développement des piles à combustible conduira à différents modes de production liés aux méthodes locales de production énergétique.

En raison de l'abondance de gaz naturel, de la disponibilité du méthanol et du propane, et du manque d'une infrastructure de production et de distribution de l'hydrogène, on prévoit que les carburants hydrocarbures seront les carburants dominants pour les applications stationnaires de piles à combustible. Tant que ces carburants sont disponibles à faible coût, le reformage hydrocarbure est la méthode la plus simple et la plus efficace pour produire l'hydrogène [7].

I.5.Construction de pile à combustible de type PEM

Beaucoup de cellules sont reliées électriquement en série pour former le stack. Chaque cellule se compose d'un assemblage membrane-électrodes qui constitue l'anode, la cathode et l'électrolyte serré entre deux plaques en graphite. Les plaques dirigent le carburant et l'air des deux côtés opposés de l'assemblage.

Un système de refroidissement est utilisé pour régler la température de fonctionnement de la pile à combustible. Pour faciliter cela, des circuits de refroidissement par cellule ou par groupe de

cellules permettent d'absorber ou de fournir (au démarrage) la chaleur. Les joints entre les plaques en graphite s'assurent que l'oxydant, le carburant et le liquide de refroidissement ne se mélangent jamais dans la pile à combustible.

Aux extrémités du stack se trouvent les connexion électrique, les bornes d'alimentation des gaz et de départ des gaz non utilisés et les bornes d'arrivée et de départ du fluide de refroidissement. Soit au total huit bornes où circulent constamment des fluides.

La conception d'une pile à combustible vise à utiliser au mieux la surface de la membrane et joue sur le compromis surface de la membrane-nombre de cellule pour obtenir la puissance désirée. Les points critiques sont les joints, les tolérances des circuits de distribution des fluides et l'alignement des cellules. Comme pour tout produit commercial, la conception résultante doit être fiable, simple à fabriquer, économiquement viable et avoir une durée de vie acceptable.

I.6 .Système pile à combustible

Un système pile à combustible exige du carburant, de l'oxydant et du liquide réfrigérant afin de fonctionner. Les pressions et les débits du carburant et de l'oxydant doivent être réglés. En outre, les gaz doivent être humidifiés et la température du système doit être contrôlée. Pour atteindre ceci, un stack de pile à combustible doit être entouré d'un système de fourniture du carburant, un système d'alimentation en air, un système de refroidissement du stack et un système d'humidification.

En fonctionnement, l'énergie produite doit être adaptée pour être utilisée par une charge. Des alarmes doivent arrêter le processus en cas de condition de fonctionnement dangereuse. Un système de mesure de la tension des cellules doit surveiller le fonctionnement du stack. Ces fonctions sont assurées par un système de contrôle.

I.7.Applications des piles a combustible[8] :

On distingue habituellement les applications des piles à combustible entre applications portables, stationnaires et embarquées

II.7.1. Applications portables

Celles-ci incluent le téléphone mobile d'une puissance moyenne de l'ordre de 400 mW et l'ordinateur portable d'une puissance moyenne de 10 W. Ces applications connaissent une très forte croissance et les recherches les plus importantes sont axées sur l'utilisation d'une pile à combustible chargeant une petite batterie qui assure mieux l'apport d'énergie lors des pics d'émission. L'autonomie n'est alors limitée que par la taille du réservoir d'hydrogène ou de méthanol. L'utilisateur recharge son portable comme on recharge un briquet ou un stylo à encre, en quelques secondes et chaque recharge donne 3 à 5 fois plus d'autonomie qu'une batterie actuelle, pour le même encombrement. La technologie qui est utilisée est la pile PEM du fait de

sa basse température de fonctionnement et de sa technologie tout solide alimentée soit directement en hydrogène, soit avec du méthanol. En terme de coût, la référence est celle de la meilleure batterie actuelle soit environ 0,80 €/Wh[8].

I-7.2.Application automobile :

Pour la traction automobile, seules les PEMFC sont pressenties. Leur température de fonctionnement relativement faible (proche de 80°C) permet d'assurer une plus grande souplesse de fonctionnement. La montée en température de la pile est plus facile et plus rapide pour les piles « basses températures » que pour les piles « hautes températures » nécessitant un système de préchauffe important. Un démarrage rapide « à froid » est alors envisageable.

Au niveau environnemental, les nuisances sonores sont faibles car les applications envisagées ne possèdent pas de pièces mobiles. Seuls les différents auxiliaires du système peuvent être source de bruit. Il faut également noter que les produits de réaction des piles sont non polluants et par conséquent les émissions de gaz nocifs de la pile seule sont nulles. Cependant, il faut également considérer la fabrication de combustible. L'utilisation d'un reformeur produit des émissions de CO₂, de particules et de NO_x non nulles mais souvent inférieures à celles des véhicules à moteur thermique. Remarquons toutefois que les émissions de gaz polluants varient fortement avec le procédé de production de l'hydrogène.

Les piles à combustibles peuvent être utilisées en complément d'une motorisation quelconque pour l'alimentation en électricité des appareils de bords (climatisation, appareils électroniques, confort...) en tant qu'APU (Auxiliary Power Unit). Pour ces applications embarquées, les PEMFC sont en concurrence avec les piles SOFC et AFC.

I.7.3.Applications stationnaires:

Compte tenu des tendances vers la décentralisation de la production d'énergie électrique, ce secteur intéresse de nombreux industriels. L'activité est centrée sur deux grands domaines d'applications : la production collective (les puissances sont dans la gamme de 200 kW à quelques MW) et la production domestique (les puissances sont dans la gamme de 2 à 7 kW). De nombreux projets et démonstrations existent déjà dans le premier domaine. Ils sont généralement basés autour de la technologie PEMFC même si d'autres technologies (MCFC, SOFC) font également l'objet de tests mais ne sont pas encore au stade d'une commercialisation. Dans le deuxième domaine, plusieurs projets sont également en cours de réalisation. Des tests sont actuellement réalisés avec plusieurs prototypes en situation réelle. Ces appareils basés sur une technologie de type PEMFC fournissent électricité et chaleur (chauffage et eau chaude). Ils sont alimentés par des combustibles classiques : un reformeur transforme le combustible hydrocarbure (généralement du gaz naturel) en hydrogène. Ce sera probablement le premier marché de masse à être occupé par la technologie pile à combustible.

I.7.4. Applications embarquées:

Le transport est le domaine d'application à l'origine du développement de la pile à combustible vers le début des années 90. Compte tenu de la contrainte de coût, particulièrement forte dans ce secteur, et de la concurrence de la technologie traditionnelle (moteur thermique), il faut distinguer deux sous-familles assez différentes suivant qu'il s'agit d'équiper un véhicule léger ou un véhicule lourd. Il est demandé au véhicule léger quelque 3000 h de fonctionnement pour une dizaine d'années de durée de vie alors qu'un véhicule lourd (transport de passagers ou marchandises) exige une durée de fonctionnement bien plus importante [8].

I-8. Les Avantages:

Les avantages généralement cités sont :

Un rendement de conversion important : grâce à la conversion de l'enthalpie libre de la réaction chimique en énergie électrique, les pertes dues normalement à la combustion du combustible, puis à la conversion de cette chaleur de combustion en énergie mécanique et enfin de l'énergie mécanique en électrique sont évitées.

Un générateur propre : les piles à combustible ne rejettent pratiquement pas de gaz nocifs (O_2 , NO) au niveau du cœur de pile.

Un système modulable : les piles à combustible sont modulables dans le sens où la taille d'une pile à combustibles peut facilement être augmentée ou réduite et le rendement électrique est relativement indépendant de cette taille.

Un système relativement silencieux ; comme elle ne comporte pas la partie mobile au niveau du cœur, le fonctionnement des piles se fait sans nuisances sonores importantes. De ce fait, les piles à combustible peuvent être placées à proximité de quartiers résidentiels.

I-9. Inconvénients :

Un fonctionnement à basse température imposé par la membrane actuellement utilisées. Il s'ensuit la nécessité d'utiliser d'une part comme catalyseur du platine et d'autre part d'alimenter le cœur de pile par de l'hydrogène par ce qui nécessite soit l'utilisation de bouteille soit un mode de reformage performant.

Une technologie qui est encore à un stade artisanal ce qui induit des coûts de fabrications élevés. Bien que la structure du cœur de pile soit assez simple. Une durée de vie encore faible en particulier si le courant délivré subit des variations importantes et répétées.

I.10 Conclusion

Dans ce chapitre on s'est intéressé aux piles à combustible et principalement aux piles PEMFC. On a abordés l'historique du développement des piles à combustible, leur principe de fonctionnement et l'architecture de ses systèmes.

Un intérêt majeur est porté aux cellules des piles à combustible, ce qui fait que des travaux importants sont encore nécessaires au niveau de la cellule. En effet, tous les éléments d'une cellule élémentaire sont encore perfectibles.

Que ce soit le catalyseur (amélioration de l'existant et recherche de nouveaux catalyseurs), la membrane (membrane fonctionnant à plus hautes températures) ou la structure elle-même de la cellule (forme géométrique, matériau des plaques bipolaires, modes de refroidissement).

Après la présentation détaillée de modèles statique de la pile, notre choix a été orienté vers le modèle de « LARMENIE ET DICK » qui s'avère le modèle adéquat pour la suite de nos travaux

Chapitre II

Généralité sur les super condensateurs

II.Introduction:

Ce chapitre présente brièvement l'état actuel de la technologie super condensateur. Nous exposerons en premier lieu les principes physiques associés au fonctionnement de ce composant, ainsi que les différents modèles rencontrés dans la littérature. Nous nous pencherons ensuite sur les applications envisagées, avec un accent mis sur les avantages de la technologie super condensateur, sur les topologies de conversion, exemples à l'appui, et sur le dimensionnement d'un organe de stockage à super condensateurs.

II.1.Super condensateur

Le principe de la double couche électrochimique est découvert par le physicien Helmholtz dans les années 1850. Il remarque que l'application d'une différence de potentiel sur des électrodes mises en contact avec un électrolyte provoque un regroupement des ions de cet électrolyte à la surface de cette interface. Pour des raisons technologiques il a fallu attendre 100 ans pour que les condensateurs à double couches électriques voient le jour, soit vers la fin des années 1950 dans l'idée de renouveler les systèmes de stockage d'énergie.

Les industriels et les scientifiques, par les progrès qu'ils apportent aux matériaux des électrodes et de l'électrolyte depuis ces 30 dernières années, ont permis de créer le super condensateur s'imposant aujourd'hui de plus en plus dans les systèmes de forte puissance.

La nature du matériau utilisé pour les électrodes divise les super condensateurs en deux familles [09]:

1. Les super condensateurs électrostatiques dans lesquels le stockage de l'électricité s'effectue par un simple déplacement de charges électroniques et ioniques. L'énergie est donc stockée dans la double couche électrique. Les électrodes sont à base de carbone activé et l'électrolyte doit être un conducteur ionique, organique ou aqueux par exemple acide sulfurique.
2. Les super condensateurs électrochimiques dans lesquels interviennent, en plus des processus faradiques réversibles. Les électrodes seront donc organiques (oxydes de métaux), ou inorganiques (polymères conducteurs). Le tableau 1-4 compare les différents types des super condensateurs.

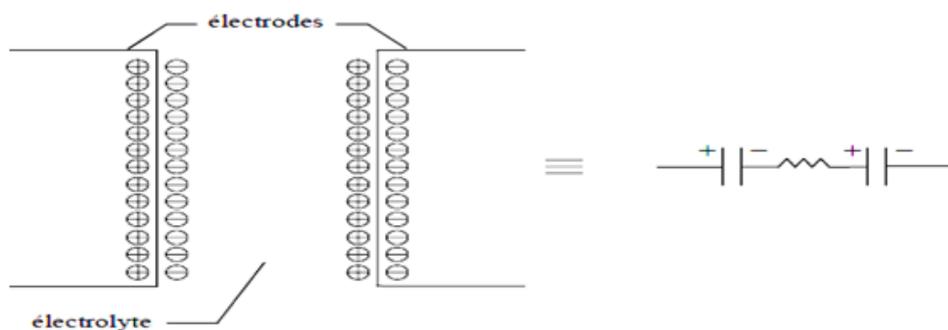


Figure.II.1 : Principe de développement des supe condensateurs

II.3. Technologies des super condensateurs

Plusieurs critères permettent de différencier les supercondensateurs : les matériaux d'électrodes, l'électrolyte, la membrane. Nous recensons, dans cette section, ces différentes technologies.

II.3.1. Matériaux d'électrodes

Il y a trois grandes catégories de matériaux d'électrodes : les charbons actifs, les oxydes métalliques, et les polymères conducteurs électroniques. Historiquement, les charbons actifs furent les premiers employés industriellement [20], et restent aujourd'hui la technologie d'électrode la plus répandue. Comme déjà dit auparavant, les dispositifs associés fonctionnent sur le principe électrostatique de la couche double électrique, et présentent à ce titre une puissance spécifique élevée, de plusieurs kW.kg^{-1} , et une durée de vie, théoriquement infinie, de plus de 100000 cycles en pratique. Les carbones utilisés peuvent se présenter sous différentes formes, suivant les constructeurs : carbone pulvérulent, fibre de carbone, nanotubes. Les surfaces spécifiques sont supérieures à $1000 \text{ m}^2.\text{g}^{-1}$, et peuvent atteindre $3000 \text{ m}^2.\text{g}^{-1}$. A noter que seule une fraction relativement faible de cette surface est utile (ions parfois trop grands pour accéder à la microporosité, porosité plus ou moins fermée par la présence de liants ou d'impuretés). Les capacités spécifiques observées restent tout de même élevées, de l'ordre de 120 F.g^{-1} à 180 F.g^{-1} en milieu aqueux (acide sulfurique), et de 60 F.g^{-1} à 100 F.g^{-1} en milieu organique.

Les deux autres technologies d'électrodes utilisent des matériaux, en l'occurrence les oxydes métalliques conducteurs électroniques (oxyde de ruthénium, oxyde d'iridium) et les polymères conducteurs électroniques (polypyrole, polythiophène, polyaniline), permettant d'obtenir une interface électrode-électrolyte pseudo-capacitive. Ces technologies sont onéreuses, et certains problèmes concernant les polymères conducteurs (stabilité en température, puissance et cyclabilité limitées) restent à résoudre.

II.3.2.Principaux constructeurs

Un certain nombre d'entreprises ont investi dans la production industrielle de super condensateurs. Citons en premier lieu les deux précurseurs japonais NEC (figure 2.9 [Nec]) et Panasonic (figure 2.10 [Pan]), dont l'activité "super condensateurs" a plus de trente années. Citons également Epcos, Elna, Avx, Cooper, Evans et Maxwell, qui proposent pour certaines des modules supercapacitifs équipés d'un circuit d'équilibrage en tension. Kold Ban International Company a commercialisé, pour le démarrage des moteurs à combustion interne par temps froid, un module de 1000 F sous 13 V nominaux, avec une puissance maximale de 17 kW. L'australien Cap-XX offre une gamme de composants, de même que le coréen Ness Capacitor. Au Canada, Tavrma propose une gamme de modules. ESMA, en Russie, vend une large variété de modules supercapacitifs pour applications véhicules électriques, démarrage de moteurs à combustion interne, hybridation de puissance

II.4.Applications courantes des super condensateurs

Les supercondensateurs sont utilisés dans les applications du domaine du transport, pour la conception des véhicules électriques et hybrides, dans le but de diminuer l'émission de gaz à effet de serre et de la pollution acoustique, en améliorant l'efficacité énergétique et en minimisant le coût de transport grâce à la récupération d'énergie notamment.

Deux exemples d'applications couramment envisagées sont de permettre le démarrage fréquent des moteurs thermiques par des supercondensateurs, en remplacement des batteries (systèmes Stop & Start...).

.La traction électrique autonome entre deux stations du transport urbain, basée sur le principe du biberonnage en station pendant l'arrêt.Type de stockeur d'énergie

II.4.1 Stockeur d'énergie fixe [11]

Les autorités de quelques villes européennes telles que Cologne, Dresde et Madrid, ainsi que de Portland Oregon, aux États-Unis, ont décidé d'introduire des systèmes de stockage à base de supercondensateurs pour récupérer l'énergie de freinage dans le domaine du transport ferroviaire urbain. Le système, développé par les ingénieurs de Siemens Transportation Systèmes, construit sous le nom de « SITRAS[®] SES » [23], équipe des sous-stations du réseau d'alimentation. Son introduction à Dresde et à Portland en 2002 a permis d'effectuer des économies de plus de 30 %. Le principal intérêt réside cependant dans la stabilisation du réseau d'alimentation électrique, car le stockeur fournit localement les pics de puissance réclamés lors de la phase de démarrage des trams.

Les supercondensateurs BCAP0010 de Maxwell, qui sont utilisés dans le système "SITRAS[®] SES", sont caractérisés par une capacité de 2600 Farads, une résistance interne de 0.4 mOhm et

une tension d'utilisation de 2.5 Volts. Le stockeur d'énergie de 64 Farads, composé de 1300 BCAP0010, est conçu pour une tension nominale de 750 Vdc. Avec la cabine, le convertisseur et l'électronique de contrôle, le système occupe un volume de 2.8 m x 2.9 m x 2.8 m et pèse 5.5 tonnes. Il fournit une puissance maximale de 1 mégawatt dans un rayon de 3 km. La batterie de supercondensateurs permet de réduire en moyenne la puissance consommée de 50 kW.



Fig. III.2 : Pack de supercondensateurs dédié à la récupération de l'énergie lors du freinage

Dans le cas de transport souterrain l'avantage est encore plus marqué. Lors du freinage, l'énergie du véhicule ne peut pas toujours être réinjectée dans le réseau, comme en soirée lorsque le nombre d'utilisateurs est faible. Dans un réseau seul 60% de cette énergie en moyenne peut être reprise par le réseau. L'énergie étant emmagasinée dans les supercondensateurs plutôt que dissipée sous forme de chaleur dans des résistances, l'élévation de température environnementale se trouve fortement réduite. Les opérateurs qui ont mis en place un système « SITRAS® SES » réalisent des économies de coûts de fourniture d'énergie pouvant se monter jusqu'à 150 000 euros par année. Parallèlement à cette économie financière, le système évite l'émission équivalente de plus de 300 tonnes de CO₂

II.4.2 Stockeur d'énergie embarqué [11] :

Lorsqu'il est question d'économie d'énergie de freinage de système de transport léger ou de réduction de l'intensité des pics de puissance dans un réseau, les ingénieurs se trouvent devant le choix, soit de placer le stockeur d'énergie à bord du véhicule, soit de le laisser fixe dans une sous-station du réseau.

Bombardier test son système économiseur d'énergie « MITRAC® » [27], sur un tram de la ville de Mannheim, depuis septembre 2003. Il est équipé d'un stockeur d'énergie capacitif se trouvant dans un conteneur de 1.9 m x 0.95 m x 4.5 m, pesant 450 kg, placé sur le toit du tram. Sa tension nominale est de 750 Vdc.

Sans compter les gains effectués sur les investissements qui eussent été nécessaires pour renforcer la puissance du réseau, l'économie annuelle d'énergie se monte à 30 000 €. A l'avantage économique s'ajoute encore l'amélioration de la situation environnementale, liée à la réduction d'émission de CO₂.

La résistance entre la sous-station et le véhicule augmente à mesure que la distance les séparant en fait de même. Pour un courant typique de 1000 A, la chute de potentiel, vue par le tram à l'endroit le plus éloigné de l'alimentation, est de l'ordre de 100 Vdc. En réduisant l'intensité du courant, cette chute de potentiel diminue proportionnellement. En plus du gain en stabilité de tension, le système profite de la réduction des pertes ohmiques dans la caténaire. Les mesures ont démontré qu'avec un stockeur capacitif embarqué, les pointes de puissance échangées avec le véhicule sont réduites de 40%. Ce résultat se traduit par un choix conceptuel pour dimensionner l'infrastructure : soit les sous-stations peuvent être éloignées les unes des autres en gardant des performances et des coûts d'exploitation constants, soit ces derniers sont améliorés en maintenant les caractéristiques de l'infrastructure. Les calculs montrent que la distance entre les sous-stations pourrait être augmentée jusqu'à 70%.

II.5 .Modélisation des supercondensateurs à couche double électrique

II.5.1.Modèle énergétique à deux branches

Certains auteurs se basent sur des considérations énergétiques pour établir leur modèle comportemental. C'est le cas de R. Bonert et L. Zubieta qui exposèrent le premier véritable modèle de supercondensateur de puissance [13] [14]. Ce modèle, dit à deux branches, repose sur la partition de l'énergie électrostatique des supercondensateurs en deux une énergie

- rapidement stockée ou disponible,
- une énergie lentement stockée ou disponible,

et comporte par conséquent deux cellules RC (figure 2.12). La première, dite principale, rend compte de l'évolution de l'énergie durant les événements de charge ou de décharge. La deuxième, dite lente, vient en complément de la première pour décrire la redistribution interne de l'énergie après lesdits événements.

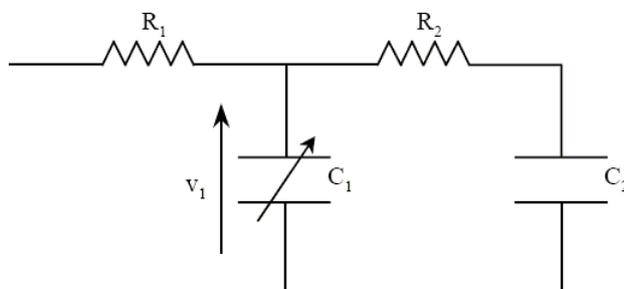


Figure 2.3 : Modèle énergétique à deux branches de R. Bonert et L. Zubieta [Bel00].

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 *et al.* [Bel00] ont montré que le modèle à deux branches menait à une sur-évaluation de la capacité principale, en particulier dans les temps courts, pour lesquels le comportement capacitif des super condensateurs est nettement de nature distribuée. Le problème réside dans ce que la procédure d'identification de la capacité principale ne dissocie pas la non-linéarité physique liée à la couche double électrique de celle, purement temporelle, liée à l'effet de ligne

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 *et al.* [Bel00] ont montré que le modèle à deux branches menait à une sur-évaluation de la capacité principale, en particulier dans les temps courts, pour lesquels le comportement capacitif des supercondensateurs est nettement de nature distribuée. Le problème réside dans ce que la procédure d'identification de la capacité principale ne dissocie pas la non-linéarité physique liée à la couche double électrique de celle, purement temporelle, liée à l'effet de ligne

II.5.2.Modèle théorique [Bel00]

De par leur fonctionnement essentiellement électrostatique, les supercondensateurs à couche double électrique sont des dispositifs capacitifs. A ce titre, nous pouvons, en première approximation, décrire leur comportement électrique par un simple circuit RC série, modèle généralement proposé, d'ailleurs, dans les spécifications "constructeurs". Cependant, la physique associée au stockage d'énergie dans les supercondensateurs à couche double électrique fait apparaître des phénomènes que le modèle RC série n'est guère à même de décrire.

En premier lieu, le stockage de charge dans la couche double électrique est un phénomène non-linéaire, avec pour conséquence macroscopique une dépendance théorique de la capacité du dispositif vis-à-vis de la tension appliquée. En pratique, les travaux de caractérisation menés par *F. Belhachemi* [Bel00] sur les supercondensateurs ont montré que cette nonlinéarité s'avérait très significative. Par exemple, l'augmentation de capacité d'un composant Maxwell PC7223 (2700 F, 2,3 V), entre 0 V et 2 V, est supérieure à 50 %.

En second lieu, la nature poreuse des électrodes conduit à une interface électrode électrolyte distribuée dans l'espace. De sorte que le stockage de charges associé à la couche double électrique peut être 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 pores (Fig.1-15). Ces différentes résistances dépendent de nombre de paramètres, tels que la résistivité des matériaux d'électrode, la résistivité de l'électrolyte, la taille des pores, la porosité de la membrane de séparation et la technologie d'assemblage (imprégnation des électrodes, qualité des contacts collecteur-électrode). Cette structure particulière confère aux supercondensateurs un comportement électrique de type ligne " RC " de transmission, observable dans les "temps courts" (typiquement inférieurs à la seconde) par une capacité dynamique progressivement accessible, et dans les "temps longs" (plusieurs centaines de secondes) par un phénomène de redistribution de l'énergie. Cependant, le nombre théoriquement élevé de branches rend impossible la détermination des différents paramètres et l'exploitation du modèle.

. II.6.Applications potentielles des supercondensateurs :

Dans les applications qui se précisent actuellement, les supercondensateurs sont utilisés en remplacement et surtout en complément des piles et accumulateurs électrochimiques afin d'assurer la fonction puissance qui leur fait défaut. On trouvera ces composants dans les systèmes nécessitant une importante énergie délivrée en un temps bref. Les principaux secteurs concernés par les supercondensateurs sont :

- l'informatique et la télécommunication pour les petits composants à faible énergie spécifique.
- les alimentations de secours et l'automobile concernant les composants à haut énergie et haute puissance spécifiques.
- Bien d'autres applications sont envisageables, et ce dans de nombreux secteurs d'activités : médical (défibrillateur), industriel (robotique), militaire (canon électromagnétique).

II.7.Informatique et télécommunication :

Le secteur des télécommunications porte un intérêt à ces composants dans les mémoires de sauvegarde en remplacement des batteries. Les supercondensateurs présentent également un intérêt en complément des batteries dans la radiotéléphonie où l'on doit disposer d'énergie durant des temps très courts (1 ms) excluant l'utilisation de batteries à forte impédance. De même, ils pourraient être exploités comme sauvegarde de mémoire en informatique. Leurs principaux avantages en comparaison avec les générateurs électrochimiques sont leur robustesse, leur grande fiabilité, leur importante puissance spécifique et une durée de vie équivalente à celle des composants passifs auxquels on les associe.

II.8.Les avantages [15]

_ Cycle de vie charge / décharge important comparé aux batteries chimiques sans dégradation des caractéristiques ;

- Densité de puissance élevée (2000-4000W/kg) correspondant à 10 fois celles des batteries de lithium-ion de puissance élevée et 100 fois celles des condensateurs classiques ;
- Capacité de capture d'énergie (freinage rétroactif) à cadence élevée : des batteries sont souvent endommagées par les charges rapides ;
- Capacité élevée (énergie élevée qui peut être déchargée rapidement) ;

ESR (résistance série) très basse ;

- Courant de fuite très faible (peut maintenir une charge sur une longue durée) ;
- Energie stockée supérieure à celle d'un condensateur conventionnel ;

Charge très rapide.

II.8.Les inconvénients [28]:

- Basse énergie spécifique (10 Wh/kg) ;
- Plage de tension limitée ;
- Technologie moins mûre que celle des batteries ;
- Prix plus élevé par rapport aux batteries d'acides de plomb qui sont assez peu coûteuses aujourd'hui et économiques
- Energie spécifique plus faible que celle des batteries ;

II.10.Conclusion :

Les super-condensateurs montrent des natures intéressantes pour les applications de grande puissance de courte durée, et possèdent des durées de vie élevées par rapport aux accumulateurs. Le secteur d'application des super-condensateurs est vaste (transport, industrie, électronique domotique, véhicule électrique...)

Les super-condensateurs sont utilisés dans notre application, comme moyen fiable de stockage (ou de confiance) et d'échange d'énergie à forte puissance et courte durée, via un hacheur. Ils peuvent être représentés dans notre étude par une association en série (condensateur C_{sc} , résistance R_{sc}).

Chapitre III

*commande de la source hybride
:picombustible /supercapcité*

III.Introduction

Ce chapitre qui se compose de deux parties est dédié à la commande par mode glissant des convertisseurs DC-DC utilisés dans le véhicule hybride.

La première partie de ce chapitre concerne la pile à combustible, connecté via un hacheur élévateur qui assure la régulation de la tension de bus continu en utilisant un régulateur de type PI.

La deuxième partie concerne les supercondensateurs, connectés via un hacheur de type « buck- boost », assurent la production ou la récupération du surplus de la puissance de charge. La commande robuste par mode glissant est utilisée pour contrôler le « buck-boost ».

III.1.Source embarqué utilisant une Pile à combustible[17]

Le schéma de principe de l'hacheur survolteur est montré sur la Fig.III.1. Il est utilisé premièrement pour adopté le niveau de tension et deuxièmement pour faire fonctionner la pile à combustible au point de puissance maximale.

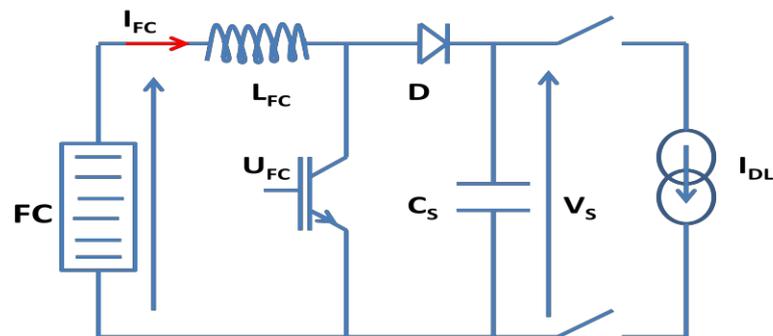


Fig.III.1 : Schéma électrique du convertisseur.

III.2.Modélisation du hacheur survolteur :

La modélisation de ce convertisseur passe par l'analyse de différentes séquences de fonctionnement selon l'état l'interrupteuT. Chaque état est représenté par une équation différentielle

Lorsque T est fermé :

$$V_{fc} = L_{fc} \frac{dI_{fc}}{dt} \quad (III.1)$$

$$0 = C_s \frac{dV_s}{dt} + I_{DL} \quad (III.2)$$

Lorsque T est ouvert :

$$V_{fc} = L_{fc} \frac{dI_{fc}}{dt} + V_S \quad (\text{III.3.})$$

$$I_{FC} = C_S \frac{dV_S}{dt} + I_{DL} \quad (\text{III.4})$$

En posant $u=1$ lorsque l'interrupteur T est fermé et $u=0$ pour T ouvert, nous pouvons représenter le convertisseur par un système d'équation unique, que nous qualifions de modèles instantanés. Nous considérons ici les interrupteurs parfaits.

$$L_{fc} \frac{dI_{fc}}{dt} = V_{fc} - (1 - U_{fc}) \cdot V_S \quad (\text{III.5})$$

$$C_S \frac{dV_S}{dt} = -I_{DL} + (1 - U_{fc}) \cdot I_{FC} \quad (\text{III.6})$$

Le modèle instantané fait apparaître un comportement non linéaire du convertisseur par l'existence de produits entre la commande u et les variables d'état V_S et I_{FC} . Par ailleurs il convient de signaler qu'en remplaçant la variable u par sa valeur moyenne sur une période de découpage $T_d=1/f_d$, c'est-à-dire le rapport cyclique D (où $D=T_{on}/T_d$) nous pouvons obtenir le modèle aux valeurs moyennes ; soit :

$$\frac{dI_{fc}}{dt} = \frac{V_{FC}}{L_{fc}} (1-D) \cdot \frac{V_S}{L_{fc}} \quad (\text{III.7})$$

$$\frac{dV_S}{dt} = -\frac{V_S}{RC_c} (1-D) \cdot \frac{I_{FC}}{C_S} \quad (\text{III.8})$$

III.3. Commande du hacheur survolteur

Concernant la commande du hacheur survolteur (figure IV.2), on a mis en place une commande de type cascade, une régulation du courant dans la bobine par hystérésis et une boucle de régulation de la tension V_S .

A partir de l'erreur sur la consigne de courant et après passage dans un relais pour être entre 0 et 1, ce signal sert directement de commande pour l'interrupteur.

III.4. Boucle de régulation d'énergie de convertisseur BOOST:

III.4.1. Brève définition de la théorie de platitude:

L'idée de la théorie de la platitude différentielle a été introduite par Michel Fliess [MF92, MF95]. L'avantage de cette approche, est que les trajectoires du système sont carrément estimés par les trajectoires d'une sortie plate et ses dérivés, sans intégrer aucune équation différentielle. Actuellement, ces idées ont été récemment utilisées dans une variété de systèmes non linéaires à travers différentes disciplines d'ingénierie, y compris :

- Contrôle de la direction de véhicules,

- Contrôle de la pression cathodique et du rapport d'excès d'oxygène d'un système PEMFC,
- Conception d'un algorithme d'orientation pour la phase hypersonique d'un véhicule de levage-corps,
- Contrôle d'un robot spatial avec des axes d'articulation orientés arbitrairement et deux roues d'inertie à la base.
- Contrôle les sources hybrides.

Un système d'équations différentielles ordinaires est dit différentielle plat, s'il existe des variables tel que :

$$\dot{x} = f(x,u) \quad (\text{III.10})$$

$$x = [X_1, X_2, \dots, X_n]^T \quad X \in R^n$$

$$u = [u_1, u_2, \dots, u_m]^T \quad u \in R^m$$

$$h = [h_1, h_2, \dots, h]^T \quad h \in R^m$$

Où x est le vecteur des variables aléatoires, u est le vecteur de contrôle, y est le vecteur des sorties plates, et $(n,m) \in \mathbb{N}$.

Un système est considéré plat, si un vecteur de sortie h existe, qui permet d'atteindre les conditions suivantes:

-Le vecteur y peut s'écrire en fonction de x et u comme suit :

$$\begin{aligned} I_H & \\ &= \varphi(x, u, \dot{u}, \dots, u^{(s)}) \end{aligned} \quad (\text{III.14})$$

Avec : s est le nombre fini de dérivées.

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

$$\begin{aligned} x &= \varphi(h, \dot{h}, \dots, h^{(r)}) \\ u &= \Psi(h, \dot{h}, \dots, h^{(r+1)}) \end{aligned} \quad (\text{III.15})$$

Avec : r est le nombre fini de dérivées.

Le vecteur des sorties plates et ses dérivées, offrent la représentation de la dynamique du système de telle sorte que si les profils des sortie plates sont connus comme une fonction du temps, alors on peut obtenir les profils de tous les états du système et les entrées correspondantes. Cette propriété est utilisée pour calculer les trajectoires des sorties plates. De toute évidence, l'avantage de l'approche de platitude différentielle, est que les variables d'état et de contrôle du système, à savoir (x, u) , sont carrément estimé par les trajectoires des sorties plates du vecteur et de leurs dérivés sans avoir besoin d'intégrer aucune équation différentielle [19].

III.5.Loi de contrôle:

Pour démontrer la platitude de notre système, il faut vérifier qu'il est toujours possible d'exprimer toutes les variables d'état et toutes les variables de contrôle du système en fonction de la sortie plate et d'un nombre fini de dérivées de cette sortie. Pour cela, on définit l'énergie électrostatique stockée dans le condensateur de sortie de convertisseur de PAC h_1 comme la sortie plate du système, P_1 comme la variable de contrôle du système et V_1 comme la variable d'état dusystème.

L'énergie électrostatique h_1 stockée dans le condensateur de BOOST :

$$h_1 = \frac{1}{2} C_s V_s^2$$

Le variable d'état du système V_s est exprimée en tant que:

$$v_s = \sqrt{\frac{2h_1}{C_s}} \quad (\text{III.16})$$

Pour prouver la platitude de notre système, le contrôle P_1 variable peut être écrit comme suit:

$$P_1 = P_2 + h_1 + r_1$$

Ainsi

$$P_1 = 2 \cdot P_{fcmax} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{Pch + h_1}{P_{fcmax}}} \right) = \Psi (h_1, h_1)$$

P_{fcmax} représentent la puissance maximale d'entrée et peut être écrite comme suit:

$$P_{fcmax} = \frac{V_{fc}^2}{4 \cdot r_{fc}}$$

$$V_s = F_{V_s}(h_1) \text{ et } P_1 = \Psi (h_1, h_1)$$

III.6. Planification de la trajectoire de référence et régulation d'énergie:

L'un des avantages majeurs à la platitude d'un système est de pouvoir planifier la trajectoire de la sortie plate. Connaissant cette trajectoire, et si la modélisation du système est sans erreur, il est alors possible de connaître l'évolution des variables d'état et de contrôle du système et ceci sans avoir à résoudre aucune équation différentielle[18].

Soit h_{1ref} la trajectoire de référence souhaitée pour la sortie plate h_1 (énergie stockée dans le IBC). L'énergie h_{1ref} est donnée par :

$$h_{1ref}(t) = \frac{1}{2} C_s V_{Sref}^2(t)$$

La figure III.2 montre la génération de trajectoire de référence h_{1ref} :

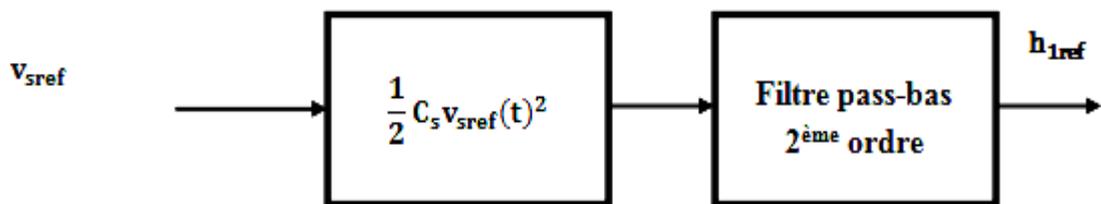


Fig.III.2 : Génération de la trajectoire de référence.

La génération des trajectoires de référence est liée aux propriétés intrinsèques du système. Elles doivent permettre de faire tendre le système vers le point d'équilibre souhaité. On a utilisé deux filtres passe-bas de deuxième ordre pour générer le trajectoire de référence pour minimiser les appels de puissances en régime transitoire.

III.7. Commande des convertisseurs DC-DC par mode glissant:

L'adaptation des niveaux de tension et de courant des éléments de l'énergie électrique (la pile à combustible et supercondensateurs) par rapport à un bus continu nécessite un convertisseur statique DC-DC. Dans le véhicule électrique à pile à combustible étudié, les convertisseurs DC-DC employés fonctionnent en mode élévateur de tension (Boost) quand les sources fournissent de l'énergie.

-La commande par mode glissant est une commande robuste, rapide et est appropriée aux convertisseurs statiques.

Le comportement dynamique de ce convertisseur est décrit par un modèle non linéaire. Il nécessite donc une commande robuste et rapide en régime transitoire. Cette commande doit être adaptée aux systèmes à structure variable. Par ailleurs, elle doit être insensible et stable à la variation de courant de charge. Les caractéristiques attendues de la commande peuvent être réalisées par une synthèse fondée sur la technique du mode de glissement.

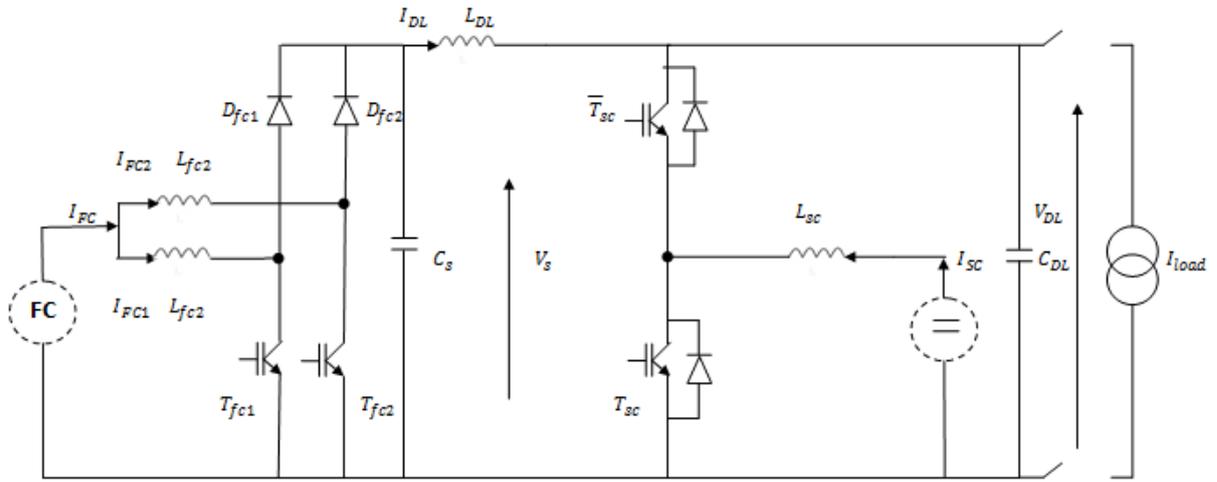


Fig.III.3 Source hybride pile et supe capa .

Equations du système :

$$\begin{cases} L_{DL} \frac{dI_{DL}}{dt} = (V_S - V_{DL}) - r_{DL} \cdot I_{DL} \\ C_{DL} \frac{dV_{DL}}{dt} = I_{DL} - I_L + I_{SC1}(1 - U_{SC1}) + I_{SC2}(1 - U_{SC2}) \end{cases}$$

$$L_{sc} \cdot \frac{dI_{sc}}{dt} = V_{sc} - (1 - U_{sc}) \cdot V_{DL} - r_{sc} \cdot I_{sc}$$

$$C_{sc} \cdot \frac{dV_{sc}}{dt} = -I_{sc}$$

$$\begin{cases} L_{FC1} \cdot \frac{dI_{FC1}}{dt} = V_{FC} - (1 - U_{FC1}) \cdot V_S - r_{FC} \cdot I_{FC1} \\ L_{FC2} \cdot \frac{dI_{FC2}}{dt} = V_{FC} - (1 - U_{FC2}) \cdot V_S - r_{FC} \cdot I_{FC2} \\ C_S \cdot \frac{dV_S}{dt} = -I_{DL} + (1 - U_{FC1}) \cdot I_{FC1} + (1 - U_{FC2}) \cdot I_{FC2} \end{cases}$$

A. Principe de contrôle du convertisseur DC-DC de la pile

Les fonctions de transferts en boucle ouverte dans le domaine de Laplace du convertisseur IBC ont été obtenues à partir du modèle moyen en petits signaux :

$$G_{ix}(s) = \frac{\widetilde{i_{Lx}}}{\widetilde{d}} = \frac{2V_{dc}}{R(1-D)^2} \frac{1 + \frac{RC}{2}s}{1 + (\frac{L}{R(1-D)^2})s + (\frac{LC}{(1-D)^2})s^2} ; G_{vx}(s) = \frac{\widetilde{v_{dc}}}{\widetilde{i_{Lx}}} = \frac{R(1-D)}{2} \frac{1 - (\frac{L}{R(1-D)^2})s}{1 + (\frac{RC}{2})s}$$

L'architecture de la stratégie de contrôle linéaire d'IBC est représentée sur la Figure 2 :

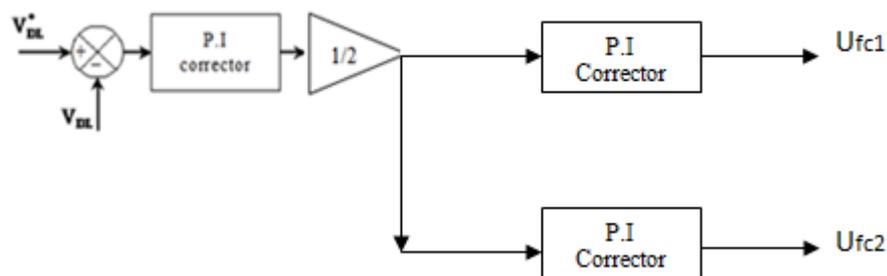


Fig.III4. contrôle du convertisseur de la pile

Cette dernière se compose d'une boucle de tension qui compare la référence de la tension du bus DC avec celle mesurée. De là, la référence totale du courant est obtenue à partir d'un contrôle PI et ensuite cette référence est partagée équitablement entre les différentes phases. pour la topologie IBC, la référence totale du courant est divisée par N=2.

B. Principe de contrôle du convertisseur DC-DC des supercondensateurs

$$S = k_1 \cdot (V_{DL}^* - V_{DL}) + k_2 \cdot (I_{SC}^* - I)$$

$$S = 0 \rightarrow I_{SC}^* = I + \frac{k_1 \cdot (V_{DL}^* - V_{DL})}{k_2}$$

$$\text{avec } I = k_{ps} \cdot (V_{SC} - V_{SC}^*) + k_{is} \cdot \int_0^t (V_{SC} - V_{SC}^*) dt$$

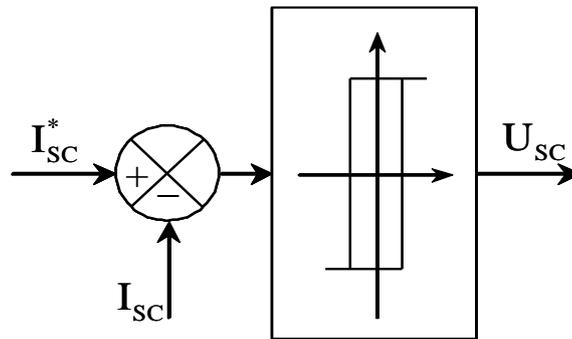


Fig.III.5.contrôle du convertisseur des supercondensateurs

Simulation de système :

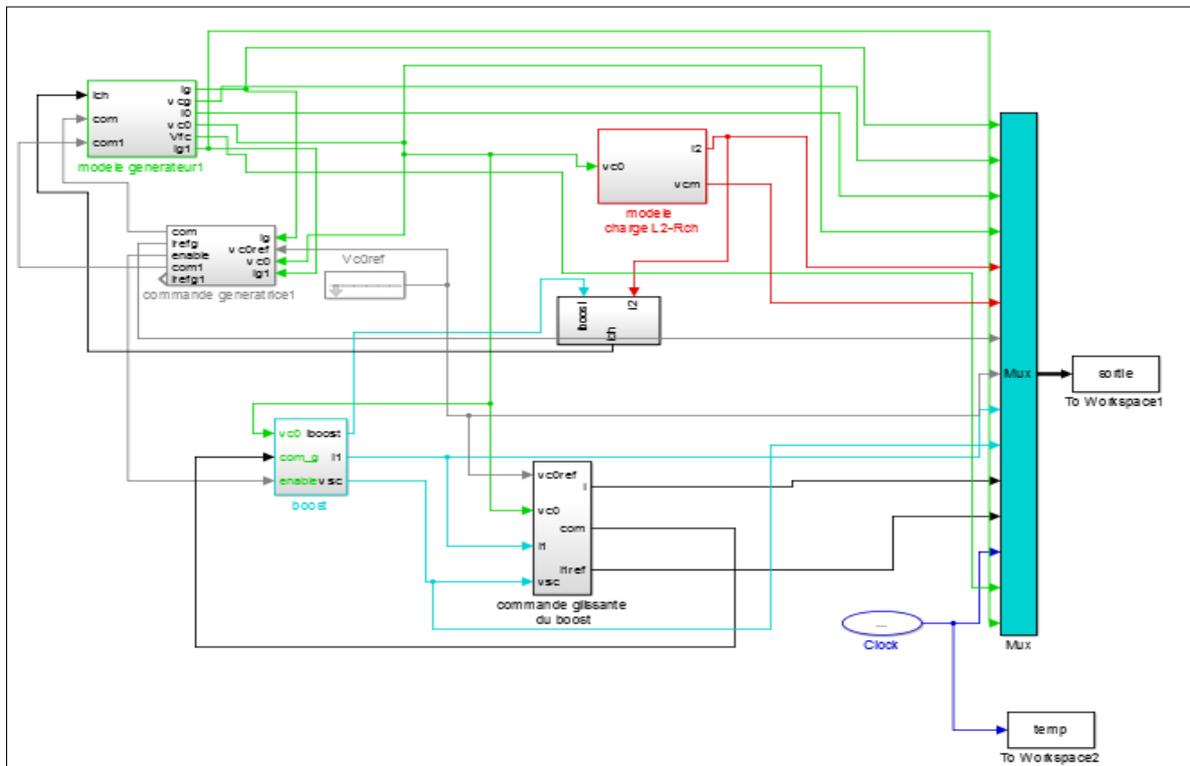


Fig.III.6.model de système sous MATLAB SIMULINK

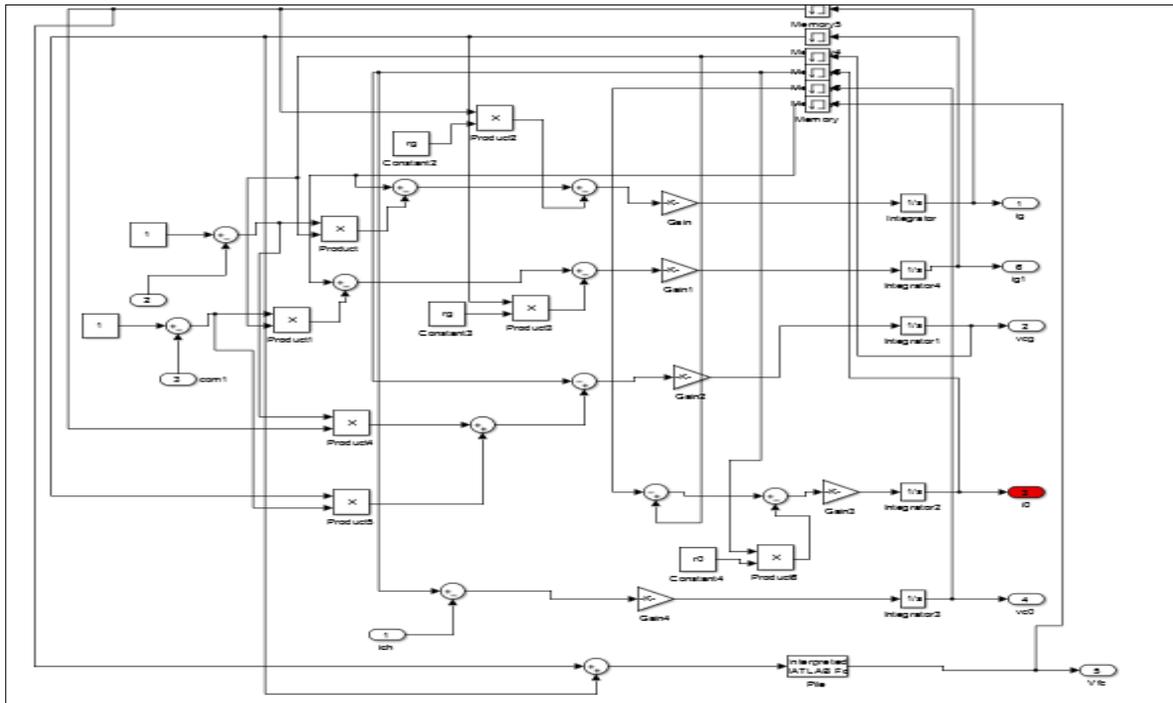


Fig.III.7.model de pile avec IBC sous MATLAB SIMULINK

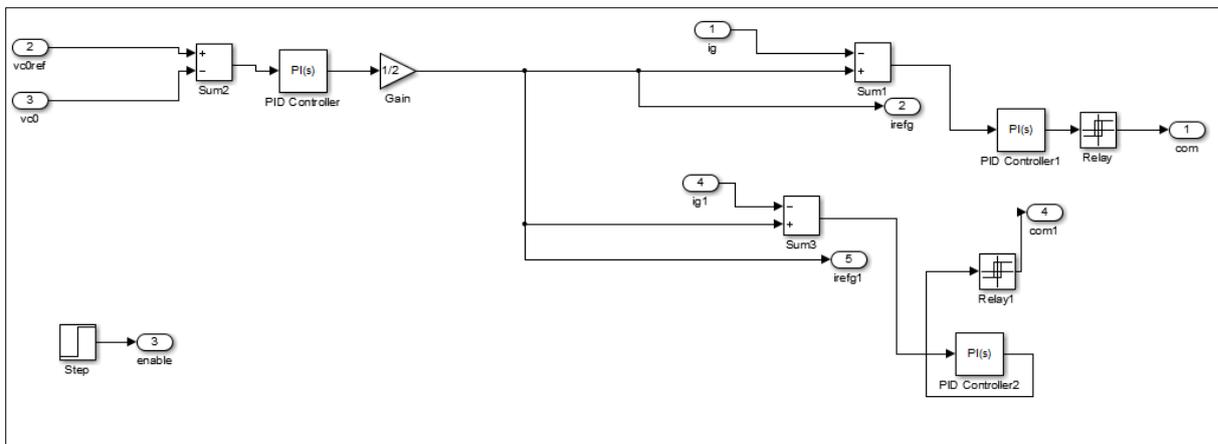


Fig.III.8.la commande de IBC sous MATLAB SIMULINK

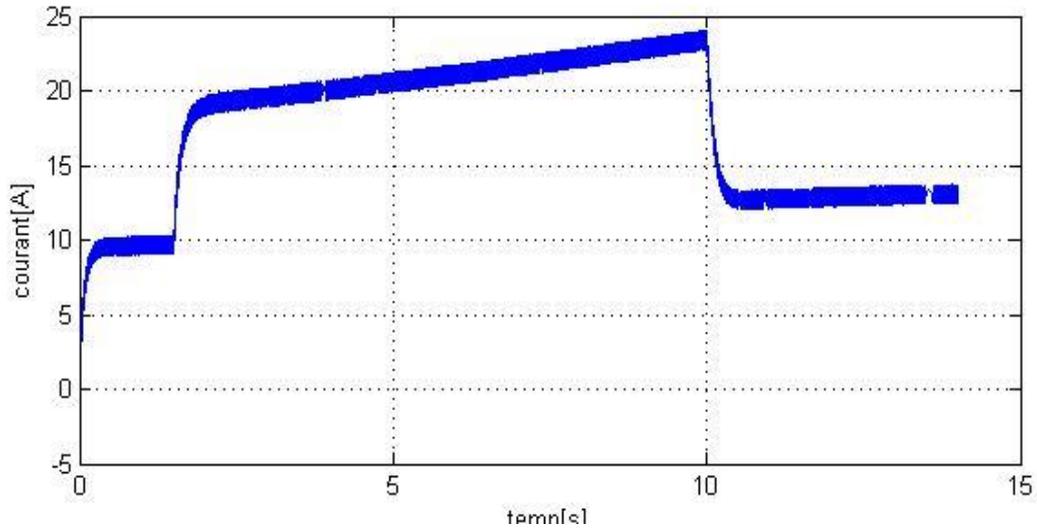


Fig.III.9. courant d'une phase d'IBC.

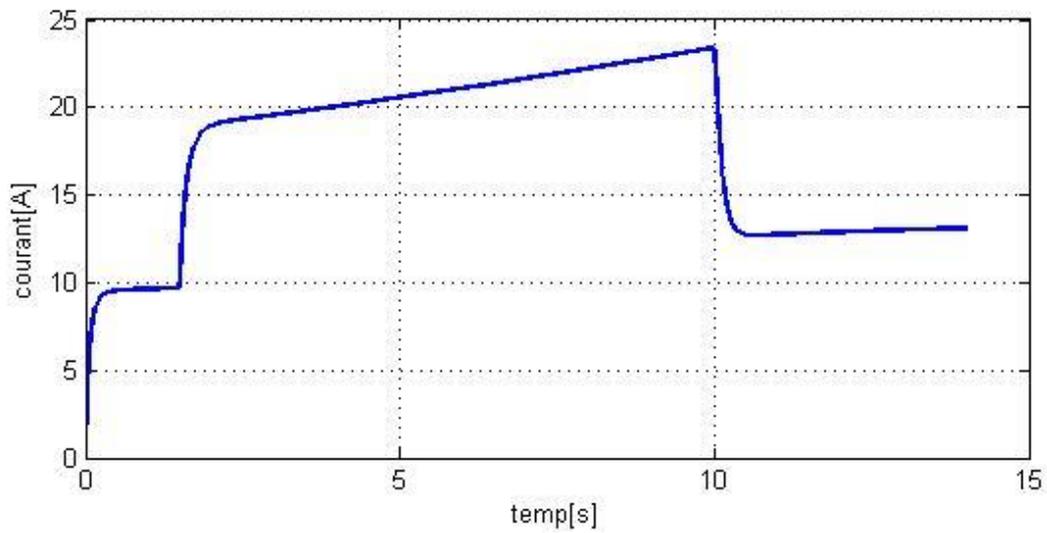


Fig.III.10. courant de référence d'une phase d'IBC.

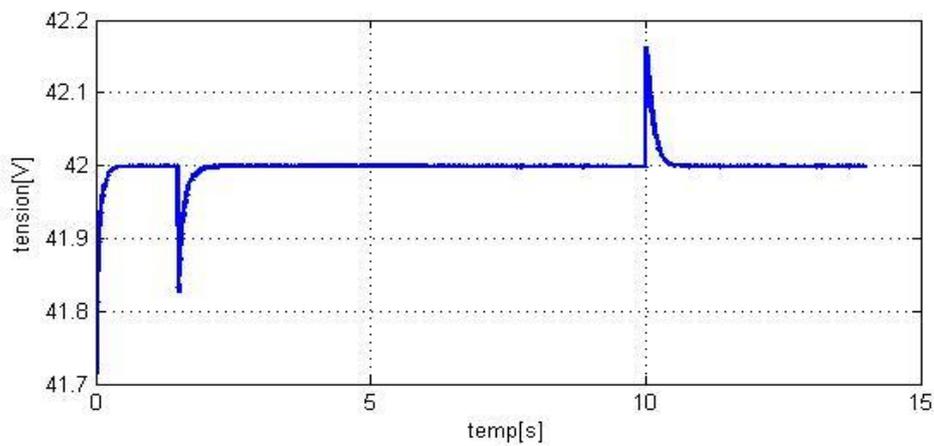


Fig.III.11. tension de bus continu.

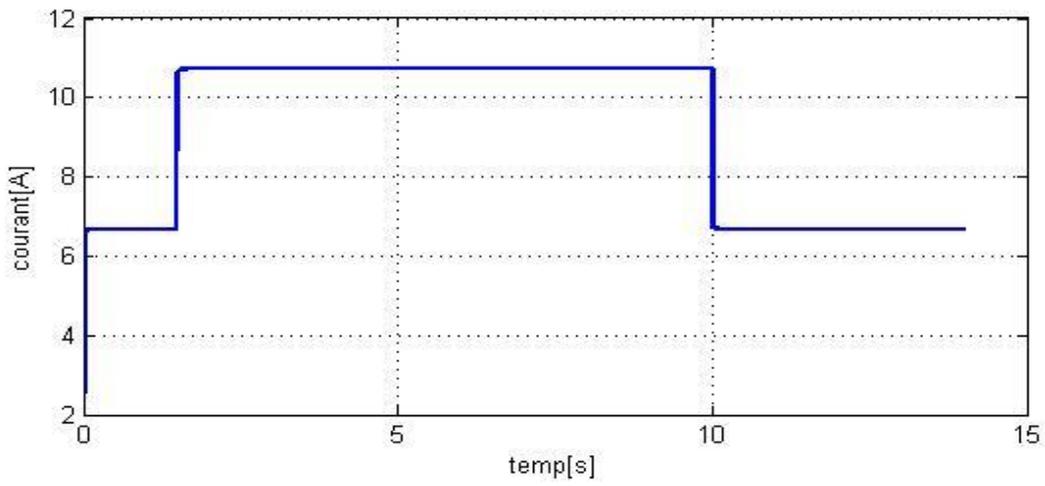


Fig.III.12. courant de a charge.

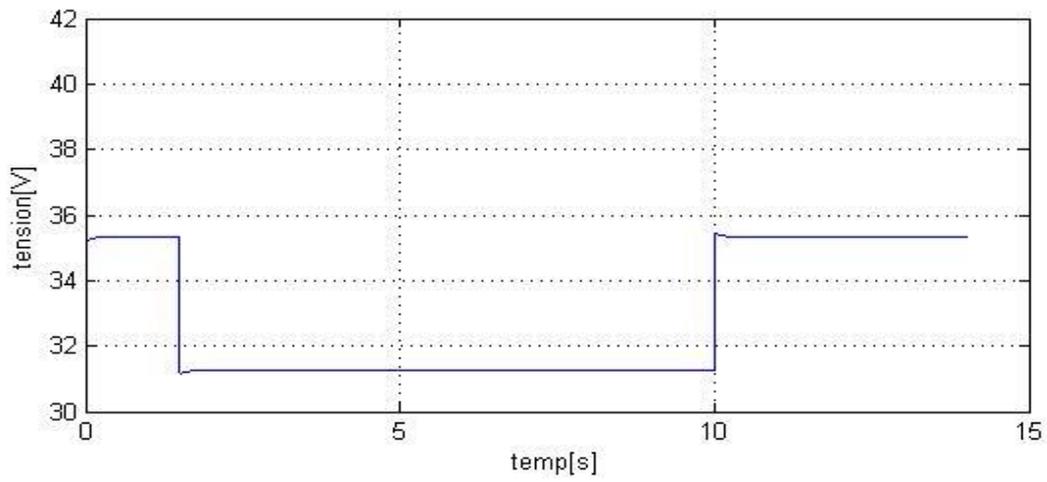


Fig.III.13. tension de la Sorté.

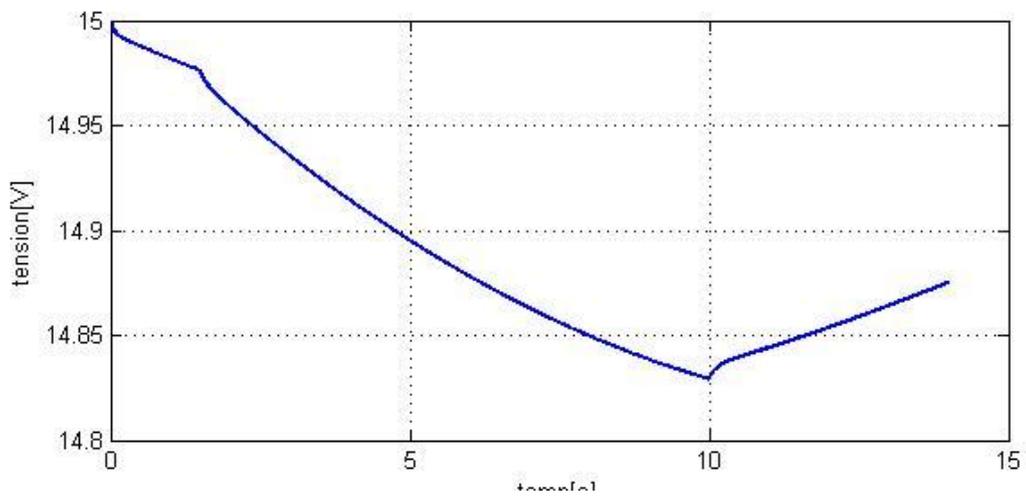


Fig.III.14. tension de la super capa.

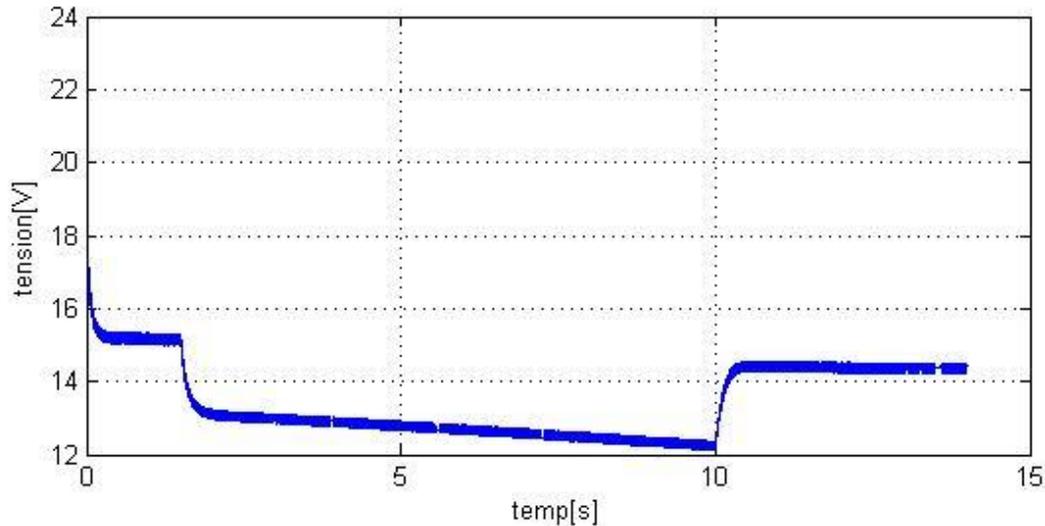


Fig.III.15. tension de la pile.

Interprétation des résultats:

Dans la figure III.10, sont présentées la tension du bus continu et sa référence, on observe que la tension du bus continu suit sa référence qui est égale à 42V quelque soit les variations de la charge. Toute perturbation de la charge entraîne une perturbation de la tension, mais ce dernier est insignifiant. La tension du bus continu reprend le chemin de la référence juste après la perturbation.

Dans la figure III.11, sont présentés le courant du générateur avec sa référence, on observe que ce courant suit bien sa référence. Il est à remarqué que durant la période de 1s à 10s, ce courant du générateur augmente en fonction de l'augmentation de la puissance du générateur.

Dans la figure III 12, sont présentées la tension de la charge avec sa référence, on observe que la tension de la charge suit bien sa référence malgré les variations de la charge. Néanmoins on remarque qu'aux moments $t=1,5s$ et $t=10s$ la charge varie et entraîne des variations minimales de la tension du bus continu durant des laps de temps insignifiants, puis cette tension reprend le chemin de sa référence.

Dans la figure IV.21, est présentée la tension du la supercapacité ; à $t=0s$ la tension est maximale et égale à 15V, c'est le phénomène inverse du courant du la supercapacité. On

remarque que la tension commence à diminuer légèrement jusqu'à $t=1,5s$ puis diminue rapidement (c'est la décharge) jusqu'à $t=10s$; puis continue sa diminution mais d'une manière légère jusqu'à $t=15s$; à partir de ce moment débute le chargement de la supercapacité et la tension commence à augmenter jusqu'à $t=20s$, puis rediminue légèrement jusqu'à $t=25s$.

Il est à noter que durant les intervalles $[0-1,5]s$; $[10-15]s$; $[20-25]s$, la puissance du générateur est égale à la puissance de la charge, et la tension de la supercapacité diminue légèrement.

Dans la figure III 13, Sont présentées les puissances du générateur et de la charge. On remarque que la puissance du générateur suit de la charge, quelle que soit les perturbations provoquées par la charge, car la source principale du système est une pile à combustible. Ainsi la relation entre les deux puissances est proportionnelle, autrement dit si la puissance du générateur augmente celle de la charge augmente aussi et si la puissance du générateur diminue, celle de la charge diminue aussi.

III.6.Conclusion :

L'objectif principal de cette étude était la modélisation, et la commande d'une source hybride utilisant pile à combustible de type PEM et supercapacité.

Les deux sources d'énergie sont connectées au bus continu via deux convertisseurs DC/DC : Boost et Back-Boost. Ces convertisseurs ont permis de réguler la tension du bus continu et de gérer le transfert de la puissance vers la charge. On utilise dans ce travail au lieu un moteur électrique une charge R-L pour tester notre système hybride.

Conclusion générale

Ce travail présente l'analyse d'une alimentation hybride pour la traction d'un véhicule hybride, constitué de deux sources et un convertisseur DC-DC. La source principale est une pile à combustible, la source auxiliaire est un supercondensateur. Notre premier objectif est le contrôle de cette source hybride via un bus continu, en appliquant une commande robuste afin d'assurer toujours une tension constante au niveau de notre bus continu d'une autre part les variations brusque de l'échange et d'autre part la dynamique rapide du supercondensateur.

Les deux sources d'énergie sont connectées au bus continu via deux convertisseurs DCDC :Boost et Back-boost. Ces convertisseurs ont permis de réguler la tension du bus continu et de gérer le transfert de puissance vers la charge. On utilise dans ce travail au lieu d'un moteur électrique une charge R-L pour tester notre système hybride.

Nous avons fait une simulation de tout le système, à savoir pile à combustible avec son hacheur « boost » et le supercondensateur avec son hacheur « buck boost », en utilisant une commande robuste basée sur le principe du platitude pour la convertisseur de la pile et par le mode glissant pour ce dernier. Cette commande optimale à permis au convertisseur DC-DC buck-boost du véhicule de forcer le système (pile à combustible + supercondensateur) à suivre les trajectoires selon les références qu'elle lui fournie.

La commande utilisée nous a permis d'établir une gestion optimale de l'énergie provenant de la pile à combustible et de la supercapacité, en tenant compte des contraintes subies par celle-ci. Les simulations ont permis de montrer que cette commande est robuste, efficace et stable pour notre système hybride.

Bibliographie

- [1]: W.HANKACHE, « Gestion Optimisée de l'Énergie électrique d'un groupe électrogène hybride à pile à combustible », thèse de doctorat, Institut National Polytechnique, 2008.
- [2] : Thomas et M. Zalbowitz, *Fuel Cells – Green Power*, prepared for the U.S. Department of Energy, under contract W-7405-ENG-36, disponible à:<http://Jeducation.lanl.gov/resources/fuelcells/fuelcells.pdf>.
- [3] : P. Thounthong, S. Raël et B. Davat, “A PEM fuel cell converter for automotive electrical system,” in Proc. 27th Electrical Engineering Conf. (EECON), Khonkaen (Thaïlande), 11-12 novembre 2004, pp. 481-484.
- [4] : i.valero exposito, « interfacement et contrôle commande de piles à combustible pour applications stationnaire et transport », thèse de doctorat, université Joseph Fourier, 2004.
- [5] : R.saisset, « Contribution à l'étude systémique de dispositifs énergétiques à composants électrochimiques. Formalisme Bond Graph appliqué aux piles à combustible, accumulateurs Lithium-Ion, Véhicule Solaire », thèse de doctorat, L'institut National Polytechnique de Toulouse, 2004
- [6] : Rivas L., Sanchez-Cortes S., García-Ramos V., Morcillo G., Growth of silver colloidal particles obtained by citrate reduction to increase the raman enhancement factor", *Langmuir*, 2001
- [7] : B.WAHDAME, « Analyse et optimisation du fonctionnement de pile à combustible par la méthode des plans d'expériences », thèse de doctorat, université de technologie de Belfort-Montbéliard et de l'université de France – Comté, 2006.
- [8] : Ph. Le Goff, “Les supercondensateurs, Les piles à combustibles,” Mise à jour : Sept. 1999 - version 2.0 : <http://pl.legoff.free.fr>.
- [9] : NEC TOKIN Corp., SuperCapacitor, <http://www.nec-tokin.com/english/product/supercapacitor/outline01.html>
- [10] : Panasonic Corp., *Gold Capacitor*, http://www.panasonic.com/industrial/components/gold_cap.htm.
- [11] : H.GUALOUS, R.GALLAY, A.BERTHON, « Utilisation des supercondensateurs pour le stockage de l'énergie embarquée : applications transport », CH1728 Rossens, Suisse.

[12] : G.Sartorielli , T.Schneuwlu ,J.Auer « Technologies et applications des supercondensateurs » colloque Energies électrique :besoins, enjeux, technologies et applications UTBM, Belfort 18 Juin 2004

[13] : R. Bonert et S.Reichert, "Super-capacitors for peak load shaving of batteries", EPE'97, Trondheim (Norvège), septembre 1997, pp. 1055-1060.

[14] : L. Zubieta et R. Bonert, "Characterization of double-layercapacitors (DLCs) for power electronics applications", IEEE-IAS'98, Saint-Louis, octobre 1998, pp. 1149-1154.

[15] : F. Belhachemi, S. Rael et B. Davat, "A physical based model of power electric double-layer supercapacitors," in *Proc. IEEE-IAS 2000 Conf.*, Rome (Italie), 8-12 octobre 2000.

[16] : D.Bouquain, A.Miraoui, « Les supercondensateurs : PRINCIPE, MODELISATION ET APLICATIONS.UTBM, Belfort Cedex-France

[17] : R. Saadi, M. Benaouadj, O. Kraa, M. Becherif, M. Ayad, A. Aboubou, M. Bahri, and A. Haddi, "Energy management of fuel cell/supercapacitor hybrid power sources based

[18] : M. Zandi, R. G. Ghoachani, M. Phattanasak, J.-P. Martin, B. Nahidmobarakeh, S. Pierfederici, B. Davat, and A. Payman, "Flatness based control of a non-ideal DC/DC boost converter," in *IECON 2011 37th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, 2011, pp. 1360-136

[19] : M. Zandi, A. Payman, J.-P. Martin, S. Pierfederici, B. Davat, and F. Meibody Tabar, "Energy management of a fuel cell/supercapacitor/battery power source for electric vehicular applications," *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, vol. 60, pp. 433-443, 2011.