



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

MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies
Electrotechnique
Réseaux électrique

Réf. : Entrez la référence du document

Présenté et soutenu par :
MECHRI ABDESALAM

Le : mercredi 25 avril 2018

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

Jury :

Mr. NAIMI DJEMAI	MCA Université de Biskra	président
Mr. SAADI RAMZI	MCB Université de Biskra	Encadreur
Mr. KIYYOUR IBRAHIM	MAA Université de Biskra	Examineur

Année universitaire : **2017/2018**

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

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

MASTER

Thème

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

Présenté par :
MECHRI ABDE SALAM

Avis favorable de l'encadreur :
Dr. RAMZI SAADI *Signature*

Avis favorable du Président du Jury

Dr. NAIMI DJEMAI *Signature*

Cachet et signature



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 par : Mr. SAADI RAMZI

Dirigé par : Mr. SAADI RAMZI

RESUMES (Français et Arabe)

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 utilisée.

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

ملخص

تقترح هذه الأطروحة إستراتيجية للتحكم في مصدر هجين يتكون من خلية وقود كمصدر أساسي و مكثفة فائقة تعمل كمصدر تخزين ثانوي. يتم توصيل مصدري الطاقة بناقل مستمر عبر محولين DC / DC: BOOST et BACK-BOOST نستخدم في هذا العمل بدلاً من محرك كهربائي حمولة R-L لاختبار نظامنا المختلط. نظام التحكم المستعمل يعتمد على مفهوم التسطيح للمحول المرتبط بخلية الوقود والتحكم المستند إلى وضع الانزلاق للمحول المتصل بالمكثفة الفائقة. تظهر نتائج المحاكاة الأداء العالي لنظام التحكم المستخدم.

الكلمات المفتاحية : خلية وقود, مكثفة فائقة, محول, نظام هجين

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 difficultés.

A tous mes chers frères.

A ma chère petite sœur : BELKIS.

A mes tantes et mes oncles et ma grand-mère et mon grand-père.

A tous ma famille.

A tous mes amis.

Je dédie ce modeste travail.

Remerciement

<< Louange à Allah qui nous a guidés à ceci. Nous n'aurions pas été guidés, si Allah nous avait pas guidés >>. [Sourate 7. Al Araf verset 43]

*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 **NAIMI DJEMAI** pour m'aider, pour l'encouragement et pour toute modestie, aussi monsieur **Kiyyour Ibrahim** 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 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_{act} : la surtension d'activation

V_{ohm} : la surtension ohmique

V_{conc} : la surtension de concentration

I_{fc} : le courant délivré par la pile à combustible

I₀ : le courant d'échange caractérisant à vide les échanges électrode-électrolyte

I_n : le courant interne

A : la pente de la droite de Tafel

R_m : la résistance totale de la pile à combustible

I_L : courant limite

B : constante de transport

C : capacité

ε₀ : la permittivité du vide

ε_r : 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

h₁ : l'énergie électrostatique stockée dans le condensateur de BOOST

V_s : le variable d'état du système

P₁ : le contrôle variable

P_{fcmax} : la puissance maximale d'entrée

h_{1ref} : la trajectoire de référence

h₁ : énergie stockée dans le IBC

<i>Titre</i>	<i>page</i>
Fig.I.1 : Principe de fonctionnement d'une pile PEMFC.....	05
Fig I.2. Classification différents types de pile à combustible en fonction de la température.....	07
Fig.I.3. Schéma synoptique d'un système à pile à combustible avec ses principaux auxiliaire..	10
Fig.I.4 : Caractéristique statique de pile PEM.....	14
Fig.II.1: Condensateur plan.....	20
Fig.II.2 : Condensateur électrolytique (a) et supercondensateur (b).....	21
Fig.II.3 : Principe de développement des supercondensateurs.....	21
Fig.II.4 : Structure interne des supercondensateurs à couche double électrique.....	22
Fig.II.5 : Modèle des super condensateurs à deux branches RC.....	24
Fig.II.6 : Modèle de R. Bonert et L. Zubieta.....	24
Fig.II.7 : Modèle de la cellule sans branche lente.....	26
Fig.II.8 : Topologie d'une alimentation sans interruption.....	27
Fig.II.9 : Circuit de secours avec : (a) une batterie, (b) des supercondensateurs.....	28
Fig.II.10. Topologie d'une motorisation de véhicule électrique alimentée par source hybride...29	29
Fig.III.1: Schéma électrique du convertisseur.....	33
Fig.III.2 : Génération de la trajectoire de référence.....	38
Fig.III.3 : La Structure d'hybride source.....	39
Fig.III.4 : MATLAB/Simulink modèle de la PEM avec BOOST convertisseur.....	42
fig.III.5 :Schéma de simulation de la commande par platitude.....	43
fig.III.6 : le courant du générateur.....	43
Fig .III.7 : Le courant de la charge.....	44
Fig .III.8 : La tension du bus continu et la référence de cette tension.....	44
Fig .III.9 : Le courant du supercondensateur.....	45
Fig .III.10 : La tension du supercondensateur.....	45

Dédicace	
Remerciement	
Liste des figures	
Liste des abréviations	
Résumé	
Sommaire	
Introduction générale.....	01

Chapitre I : généralité sur les piles à combustibles

I-1.Introduction	04
I-2.Principes de fonctionnement	05
I-3.Les différents types de piles à combustible	06
I-4.Les piles à combustible de type PEM	08
I-5.Hydrogène	08
I-6.Système pile à combustible PEM	09
I-6.1.Auxiliaires d'une pile à combustible PEM	09
I-6.2.Alimentation en combustible.....	11
I-7.Applications des piles à combustible.....	11
I-7.1.Applications stationnaires	12
I-7.2.Application automobile.....	12
I-7.3.Application portable.....	13
I-8.Modélisation de la pile à combustible	14
I-8.1.Pertes d'activation.....	14
I-8.2.Pertes ohmiques	15
I-8.3.Pertes de concentration	15
I-9.Avantages et inconvénients des piles à combustible de type PEM	16
I-9.1.Avantages	16
I-9.2. Inconvénients.....	16
I-10.Conclusion.....	17

Chapitre II : généralité sur les supercondensateurs

II.1.Introduction	19
II.2.Principe de fonctionnement	19
II.3.Modélisation comportementale des supercondensateurs.....	23
II.3.1.Modélisation des supercondensateurs	23
II.3.2.Modèle d'une cellule sans branche lente.....	25
II.4.Applications potentielles des supercondensateurs.....	26
II.4.1.Informatique et télécommunication.....	26

II.4.2.Alimentations de secours	27
II.4.3.Secteur automobile.....	28
II.5.Les avantages et les inconvénients des supercondensateurs	30
II.5.1.Les Avantages.....	30
II.5.2.Les inconvénients	30
II.6.Conclusion	31

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

III.1.Introduction	33
III.2.Source embarqué utilisant une Pile à combustible.....	33
III.2.1.Modélisation du hacheur survolteur	33
III.2.2.Commande du hacheur survolteur	35
III.3.Boucle de régulation d'énergie de convertisseur BOOST.....	35
III.3.1.Brève définition de la théorie de platitude.....	35
III.3.2.Loi de contrôle.....	36
III.3.3.Planification de la trajectoire de référence et régulation d'énergie	37
III.4.Commande des convertisseurs DC-DC par mode glissant	38
III.5.Source embarqué utilisant une pile à combustible et des super condensateurs.....	39
III.5.1.Modélisation de système	39
III.5.2.Application de la commande mode glissement.....	40
III.5.3.Le schéma de simulation.....	42
III.5.4.Les résultats de simulation.....	43
III.5.5Interprétation des résultats.....	46
III.5.6.Les paramètres.....	47
III.6.Conclusion.....	47
Conclusion générale.....	48

Bibliographie

Introduction générale

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...). Pour cela, entreprises, centres de recherche et universités s'orientent actuellement vers des solutions autour de piles à combustible et ceci dans différents secteurs (électronique, téléphones portables, véhicules, avionique, production stationnaire d'électricité, chauffage...) et investit dans le développement de cette technologie qui présente un faible taux d'émission de gaz polluant.

Les véhicules hybrides dans lesquels une source secondaire d'énergie électrique vient soutenir le moteur à combustion interne sont une alternative prometteuse à court terme favorisant la limitation en consommation de combustible et constituant une étape intermédiaire vers un « tout électrique ».

Dans cette thématique, s'intègrent les véhicules hybrides à pile à combustible qui combinent d'une part une pile à combustible pour la production embarquée d'électricité et d'autre part un élément de stockage de l'énergie électrique (supercapacités, batteries...). Ces véhicules possèdent les bénéfices des voitures électriques concernant notamment une zéro émission et une indépendance totale du pétrole d'une part et d'autre part l'avantage d'un véhicule conventionnel à savoir une autonomie meilleure et une possibilité de ravitaillement rapide avec l'utilisation de l'hydrogène stocké dans des réservoirs sous pression ou produit à bord.

Ce mémoire s'inscrit dans le cadre du contrôle d'une source hybride utilisant un bus continu, convertisseurs, pile à combustible et des supercondensateurs pour traction électrique « Véhicule hybride ». Il est équipé des éléments suivants :

- ✓ Une pile à combustible de type PEM, utilisé comme source principale.
- ✓ Un module de supercondensateur, employé comme source d'appoint de puissance.

L'adaptation des niveaux de tension entre les sources et la charge dans le véhicule nécessite deux convertisseurs statiques, l'un de type Boost, l'autre Buck-boost, permettant de maintenir

constante la tension du bus continu à une valeur constante et d'imposer la puissance ou le courant demandé par la charge.

Dans le premier chapitre de ce mémoire, nous avons présentés généralité sur les piles à combustible et ses avantages et inconvénients ainsi que les applications de cette source.

Le deuxième chapitre, a été dédié à la définition des super capacités et ses caractéristiques .

Dans le troisième chapitre, traite la simulation et la commande de la source hybride utilisant la commande par platitude et mode glissant.

I-1.Introduction :

La première pile à combustible a été inventée par Sir William Robert Grove, en 1839 un professeur de philosophie expérimentale à l'Institut Royal de Londres. Depuis, il est connu comme « le Père de la pile à combustible ». Ses expériences sur l'électrolyse - l'utilisation de l'électricité pour séparer l'eau en hydrogène et oxygène - ont mené à la première mention d'un dispositif qui plus tard se nommera pile à combustible. Il a pensé qu'il était possible de renverser le procédé d'électrolyse et de produire de l'électricité en faisant réagir de l'oxygène avec de l'hydrogène. Pour vérifier cette théorie il a enfermé deux bandes de platines dans des bouteilles séparées, l'une contenant de l'hydrogène l'autre de l'oxygène. Quand ces récipients ont été immergés dans de l'acide sulfurique dilué un courant a commencé à s'établir entre les deux électrodes et de l'eau s'est formée dans les bouteilles de gaz. Pour augmenter la tension produite, il a placé plusieurs de ces dispositifs en série et a produit ce qu'il a appelé une « batterie à gaz », le précurseur de la pile à combustible moderne [Stmz].

La pile à combustible a connu une renaissance au début des années 60 lorsqu'un nouvel organisme gouvernemental des USA - the National Aeronautics and Space Administration (NASA) - rechercha comment produire de l'énergie pour les vols spatiaux. La NASA avait déjà éliminé les batteries car elles étaient trop lourdes, l'énergie solaire car source trop chère et l'énergie nucléaire car trop risquée, et cherchait une source alternative. La pile à combustible est apparue comme une solution possible, et la NASA a attribué un certain nombre de contrats de recherche pour développer cette solution. Cette recherche a mené au développement de la première membrane échangeuse de protons ou « membrane d'électrolyte polymère » [Bc02].

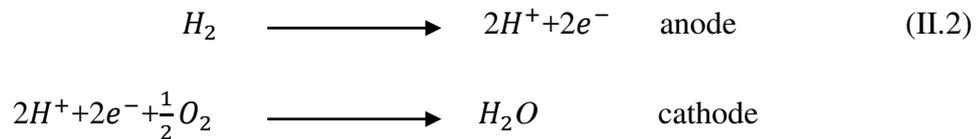
Ces piles à combustible utilisaient de l'oxygène pur et de l'hydrogène pur et étaient de petite taille, chères et non disponibles dans le commerce. L'intérêt de la NASA pour les piles à combustible et la crise l'énergie de 1973 ont relancé le développement de ce dispositif. Depuis, la recherche sur les piles à combustible a continué et des piles à combustible ont été utilisées avec succès dans une grande variété d'applications [Maj04].

I-2.Principes de fonctionnement :

Le principe de fonctionnement d'une pile à combustible est décrit par une relation chimique. Cette réaction chimique est une oxydoréduction électrochimique. Elle fait réagir l'hydrogène et l'oxygène pour produire de l'électricité, de l'eau et de la chaleur, selon la réaction chimique globale suivante :



Cette réaction s'opère au sein d'une structure essentiellement composée de deux électrodes (l'anode et la cathode) qui seront les conducteurs électriques, séparées par un électrolyte solide qui sera le conducteur protonique. Plus précisément, les réactions suivantes interviennent aux deux électrodes :



Ces demi-réactions sont catalysées, à l'aide de platine en général, pour augmenter les cinétiques de réactions, relativement lentes aux faibles températures de fonctionnement de la pile. A l'anode, l'hydrogène se dissocie en protons et électrons. Les protons traversent alors l'électrolyte pour se recombiner à la cathode avec les molécules d'oxygène, et ainsi former de l'eau. Les électrons circulent dans un circuit externe pour boucler le circuit électrique. Un schéma de fonctionnement est donné sur la figure suivante :

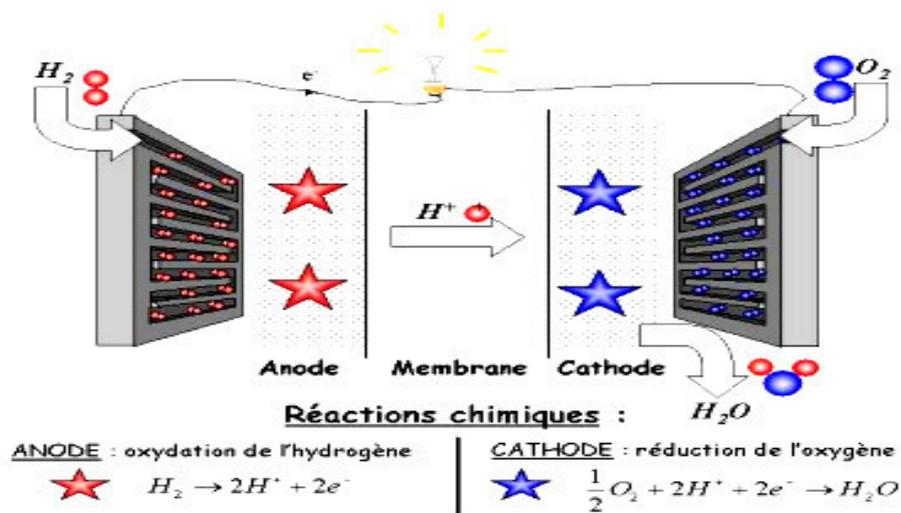


Fig.I.1 : Principe de fonctionnement d'une pile PEMFC.

Pour compléter l'Assemblage Membrane Electrodes (AME), des diffuseurs poreux sont accolés de chaque côté afin d'assurer une répartition uniforme des réactifs sur toute la surface des électrodes. Les plaques bipolaires permettent également l'alimentation en gaz du système et son refroidissement. Elles assurent également le contact électrique entre plusieurs cellules connectées en série, afin de disposer d'une puissance plus importante.

En ces points nous trouvons, autour de la particule de catalyseur :

- ❖ Une structure poreuse capable d'assurer la diffusion de l'hydrogène ou de l'oxygène moléculaire.
- ❖ Une structure hydrogène hydrophobe pour assurer l'élimination de l'eau formée, dans le cas de la cathode.
- ❖ Une structure thermiquement conductrice pour assurer l'évacuation de la chaleur de réaction.
- ❖ Une continuité physique avec l'électrolyte pour assurer la conduction des protons H^+ .
- ❖ Une continuité physique avec le conducteur électronique qu'est l'électrode, pour assurer la conduction des électrons e^- .

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

Les différents types des piles à combustible sont classés selon la nature de leur électrolyte et par le niveau de leur température de fonctionnement, leur architecture et les domaines d'application dans lesquels chaque type peut être utilisé. Il existe actuellement six types de piles à combustible :

- Les piles à membranes polymère échangeuse de protons (PEMFC Proton Exchange Membranes Fuel Cell)
- Les piles au méthanol direct (DMFC Direct Methanol Fuel Cell)
- Les piles à acide phosphorique (PAFC Phosphoric Acid Fuel Cell)
- Les piles alcalines (AFC Alkaline Fuel Cell)
- Les piles à oxydes solides (SOFC Solid Oxide Fuel Cell)
- Les piles à carbonates fondus (MCFC Molten Carbonate Fuel Cell)

Les piles à combustible fonctionnant à haute température ($>800\text{C}^\circ$) présentent la possibilité d'utiliser directement les composés hydrogénés comme combustible, sans catalyseur noble (platine), due à la température élevée de fonctionnement qui favorise la décomposition des molécules et augmente la vitesse des réactions chimiques. En revanche, la durée nécessaire pour atteindre la température nominale constitue un obstacle pour l'utilisation de cette pile dans les applications de transport pour lesquelles les démarrages sont rapides et fréquents. D'autre part, les applications de transport exigent une pile à électrolyte solide, comme SOFC et PEMFC, qui permet de réduire le risque de fuite et de faciliter l'industrialisation de ces piles. Les piles de type PEMFC, ayant une température de fonctionnement relativement faible, sont actuellement retenues dans le cadre de la majorité des projets de transport. Ces piles sont mieux adaptées à la gestion des cycles démarrage/arrêt que les piles de type SOFC fonctionnant à une haute température. A noter que ces dernières sont surtout utilisées dans les applications stationnaires : dans ces applications, le rendement global du système énergétique est fortement amélioré par la valorisation de la chaleur produite par l'oxydoréduction (chauffage du local, turbine auxiliaire, ...) [RT09].

La figure I-2 représente une classification des différents types de pile à combustible en fonction de la température et le tableau I-1 récapitule les différents types de piles et leurs caractéristiques respectives.

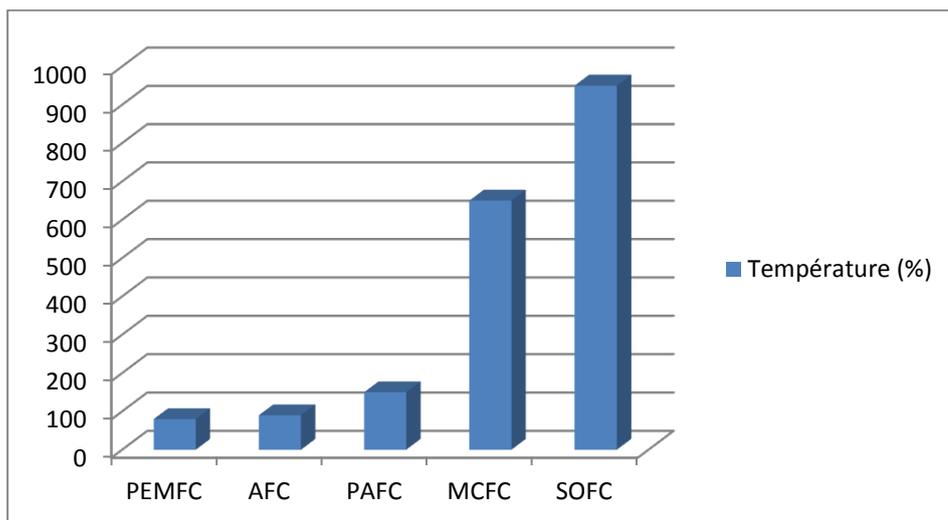


Fig I-2.Classification différents types de pile à combustible en fonction de la température.

Type de pile	AFC	PEMFC	DMFC	PAFC	MCFC	SOFC
Nom	Alkaline Fuel Cell	Polymer Exchange Membrane Fuel Cell	Direct Methanol Fuel cell	Phosphoric Acid Fuel Cell	Molten Carbonate Fuel Cell	Solid Oxide Fuel Cell
Electrolyte	Solution KOH	Membrane polymère conductrice de protons	Membrane polymère conductrice de protons	Acide phosphorique	Li ₂ CO ₃ et KCO ₃ fondu dans une matrice LiAlO ₂	ZrO ₂ et Y ₂ O ₃
Ions dans l'électrolyte	OH ⁻	H ⁺	H ⁺	H ⁺	CO ₃ ²⁻	O ²⁻
Niveau de température	60-80°C	60-100°C	60-100°C	180-220°C	600-660°C	700-1000°C
Combustible	H ₂	H ₂ (pur ou reformé)	Méthanol	H ₂ (pur ou reformé)	H ₂ (pur ou reformé)	H ₂ (pur ou reformé)
Oxydant	O ₂ (pur)	Air	Air	Air	Air	Air
Domaines d'application	Spatial	Automobiles, Portable, Cogénération	Portable	Cogénération	Cogénération Production centralisée d'électricité	Cogénération Production centralisée d'électricité Automobile (APU)
Niveau de développement	Utilisée	Utilisée	Prototypes	Technologie mûre	Prototypes	Prototypes

Tableau I-1. Comparaison des différentes technologies de piles à combustible.

I-4. 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-5. 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 (H_2) n'existe pas naturellement sur terre et se présente sous formes composées. Combiné avec l'oxygène, c'est l'eau (H_2O).

Combiné avec le carbone, il forme les composés organiques tels que le méthane (CH_4), 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 de l'hydrogène [RSG01].

I-6. Système pile à combustible PEM :

Un stack de pile à combustible nécessite pour son fonctionnement l'ajout de plusieurs appareils auxiliaires destinés à l'alimentation et au conditionnement des gaz, à la gestion de l'humidification de la membrane et au contrôle de la température de fonctionnement du système [Fre01, Büc97, Atk04].

I-6.1. Auxiliaires d'une pile à combustible PEM :

Les piles à combustible PEM sont les différents appareils qui entourent le stack. On rencontre généralement :

- un compresseur ou une turbine qui alimente le circuit cathodique en air.

- un système d'alimentation en hydrogène qui selon que l'hydrogène est fabriqué sur place ou non, comprend dans le premier cas un système de reformage et dans le deuxième cas des réservoirs sous pression et un ou des détendeurs assurant le réglage de la pression de l'hydrogène à celle de fonctionnement de la pile.
- un ou deux humidificateurs selon qu'un ou deux des gaz d'alimentation sont humidifiés afin de permettre un bon fonctionnement des membranes.
- différents accessoires destinés à la distribution des gaz (électrovannes, tuyauteries...).
- un circuit de refroidissement qui permet la régulation de la température de fonctionnement de la pile (circuit de refroidissement et de chauffage pour le démarrage, capteurs thermiques...).
- un convertisseur statique qui permet la gestion de l'énergie délivrée par la PAC.
- un élément de contrôle assurant la gestion des flux de gaz en fonction du courant demandé et la sécurité du système.

La présence de ces appareils qui consomment une partie de l'énergie produite par la pile à combustible dégrade le rendement du système. Leur conception est donc souvent un élément clé dans le développement d'un système pile à combustible.

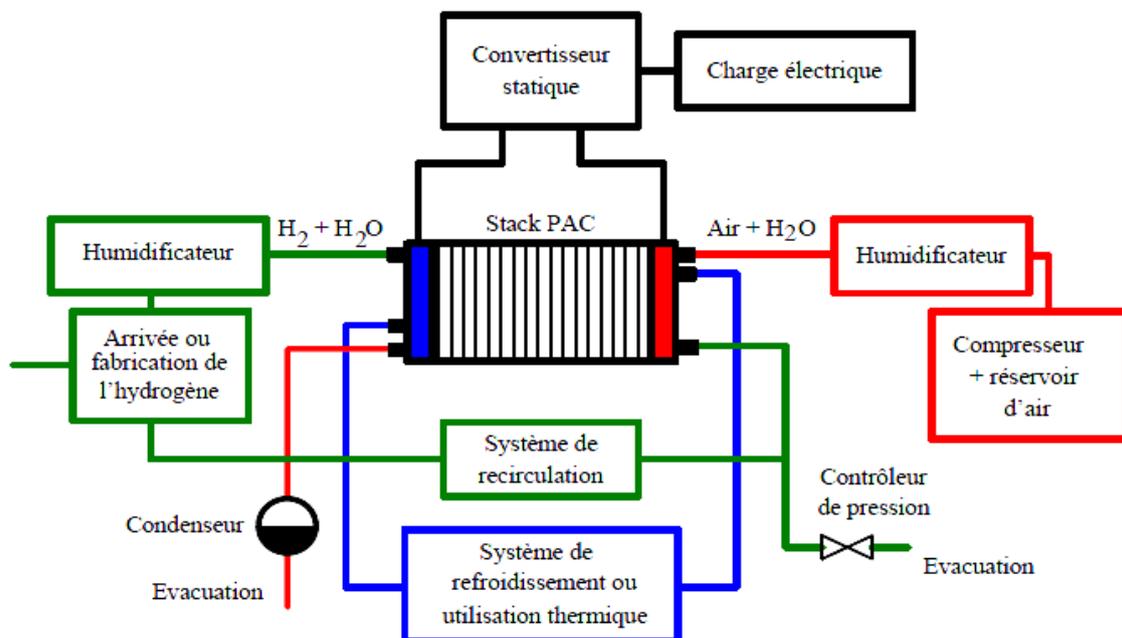


Fig.I.3 : Schéma synoptique d'un système à pile à combustible avec ses principaux auxiliaires.

I-6.2. Alimentation en combustible :

Si la pile à combustible est souvent présentée comme un générateur de courant (et de chaleur) non polluant c'est oublier le procédé de production de l'hydrogène, élément certes le plus répandu dans l'univers mais n'existant pas naturellement sur Terre sous forme gazeuse.

On peut imaginer de l'utiliser sous forme d'hydrogène pur stocké en bouteilles haute pression ou dans des hydrures métalliques [Maz05, Lee00, Los02]. On renvoie alors le problème de pollution au lieu de production. On peut aussi le fabriquer sur place par un procédé de reformage. Le mode de production retenu de l'hydrogène dépend beaucoup du type d'application.

Pour les applications portables, en dehors des piles à méthanol direct, il n'est pas envisageable d'utiliser un reformeur (encombrement, difficulté de miniaturisation...).

I-7. Applications des piles à combustible :

Les espoirs de commercialisation rapide des piles à combustibles sont fondés sur les différents avantages présentés par cette technologie pour la production délocalisée d'électricité.

L'ensemble des piles à combustibles présentent des rendements électriques élevés : de 40% à 70%. Cependant, la prise en compte du système dans son intégralité (avec les humidificateurs, compresseurs et autres auxiliaires de fonctionnement) peut parfois réduire considérablement le rendement électrique global.

Le principe d'assemblage des piles permet une construction modulaire. Pour obtenir des puissances électriques plus importantes, deux voies sont exploitables :

- augmenter la surface de la cellule pour intensifier les échanges électroniques et donc augmenter l'intensité d' délivrée par chaque cellule
- ou connecter plusieurs cellules en série afin d'accroître la tension totale délivrée par l'empilement.

Ces techniques d'assemblage, particulièrement adaptées aux PEMFC, simples de principe, offrent une large gamme d'utilisation : de 1W pour les petites applications jusqu'à plusieurs centaines de kW, pour les applications importantes. Nous avons regroupé les domaines d'application en trois classes : applications stationnaires, automobiles et portables. [Asc03]

I-7.1.Applications stationnaires :

Parmi les applications stationnaires, il faut distinguer la production centralisée d'électricité pour l'industrie et la production décentralisée, avec en particulier les applications stationnaires de faibles puissances et la cogénération de moyennes puissances pour le résidentiel ou pour des postes de secours.

En ce qui concerne la production centralisée d'électricité, certaines études envisagent de remplacer les centrales thermiques trop polluantes par des systèmes de piles à combustibles. Cependant, les installations actuelles ne dépassent que rarement la puissance de 1 MW. Pour ces applications importantes, la cogénération, qui permet une valorisation de la chaleur produite, est souvent utilisée afin d'améliorer le rendement électrique global de l'installation.

Pour la production décentralisée, les puissances types sont de l'ordre du kW. En plus de l'électricité, la chaleur produite par les piles à combustibles peut être utilisée pour la production d'eau chaude, le chauffage ou la réfrigération... Ainsi, ces dispositifs sont particulièrement adaptés aux applications domestiques et industrielles légères. De plus, la production délocalisée permet d'envisager ces applications pour des lieux isolés où l'acheminement de l'électricité peut être difficile et très coûteux. Enfin, les systèmes de secours ou de sécurité requérant une grande fiabilité peuvent être alimentés par une pile à combustible indépendamment du réseau électrique.

Après les premiers essais réalisés avec des piles à acide phosphorique (PAFC) dans les années 1990, le marché s'est orienté vers les piles MCFC, SOFC et PEMFC. Les piles hautes températures, c'est-à-dire les MCFC et SOFC, sont plus particulièrement adaptées aux applications de moyennes ou fortes puissances. Leur température de fonctionnement élevée (supérieure à 600°C) permet une conversion de la chaleur produite en électricité à l'aide d'une turbine à vapeur ou à gaz. On peut les opposer aux PEMFC dont les faibles températures de fonctionnement rendent difficile la valorisation de cette énergie. Ce type de pile ne présente qu'un intérêt réduit pour les applications en cogénération (électricité et chaleur) mais peut assurer l'alimentation en électricité de postes de secours et de sécurité.

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. Application portable :

Le marché des appareils électroniques portatifs (téléphones, ordinateurs, caméscopes, agendas électroniques...) en constante croissance peut également être conquis par les piles à combustibles. Ces appareils, d'une gamme de puissance comprise entre 0.1 et 10 W, souffrent actuellement de leur faible autonomie. En revanche, avec une pile à combustible, l'autonomie ne dépend que de la taille du réservoir de carburant (hydrogène ou méthanol).

La grande modularité des piles permet de créer des piles de petites puissances ne comportant que quelques cellules de faibles surfaces. Toutefois, la miniaturisation du système pour obtenir des puissances inférieures au W semble avoir ses limites. La création de micro pile passe par la miniaturisation de l'ensemble des composants (pile, pompe, convertisseur de courant...)

I-8. Modélisation de la pile à combustible :

De nombreux travaux comme par exemple [Cor03], [Sad04] et [Els04] proposent un modèle statique décrivant la courbe de polarisation de la pile PEM comme la somme de quatre termes: la tension théorique à vide E , la surtension d'activation V_{act} (ou chute d'activation de la région 1), la surtension ohmique V_{OHm} (ou chute ohmique de la région 2) et la surtension de concentration V_{conc} (ou chute de concentration de la région 3) :

$$V_{fc} = E - V_{act} - V_{OHm} - V_{conc} \quad (I.3)$$

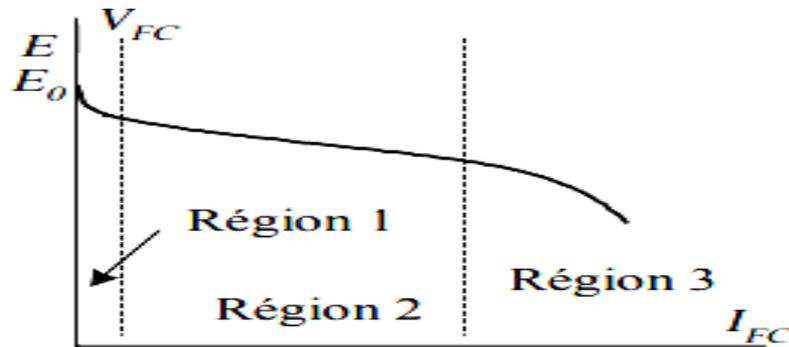


Fig.I.4 : Caractéristique statique de pile PEM.

I-8.1. Pertes d'activation : [Lee98]

Les pertes d'activation sont dues 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 aux électrodes. Si ces pertes interviennent aux deux électrodes, la réaction d'oxydation de l'hydrogène à l'anode est beaucoup plus rapide que la réduction de l'oxygène à la cathode. Il s'ensuit que les pertes d'activation sont essentiellement dues aux réactions cathodiques. La relation entre les pertes d'activation et la densité de courant est donnée par l'équation de Tafel :

$$V_{act} = A \ln \left(\frac{I_{FC} + I_n}{I_0} \right) \quad (I.4)$$

où I_{fc} est le courant délivré par la pile à combustible, I_0 le courant d'échange caractérisant 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 et A la pente de la droite de Tafel.

I-8.2. Pertes ohmiques :

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 :

$$V_{Ohm} = R_m (I_{FC} + I_n) \quad (I.5)$$

Où R_m est la résistance totale de la pile à combustible. [Iqb03]

I-8.3. Pertes de concentration :

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

Cette chute de tension s'exprime en fonction d'un courant limite I_L , pour lequel tout le combustible étant utilisé sa pression tomberait à zéro, et d'une constante B appelée constante de transport ou de transfert de masse : [Cor04]

$$(I.6) \quad V_{conc} = - B \ln \left(1 - \frac{I_{fc} + I_n}{I_L} \right)$$

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

Les avantages et inconvénients des piles à combustible dépendent bien entendu du type de pile considéré et donc de l'application envisagée. Nous nous intéressons principalement ici à la pile PEM même si certaines des qualités et des défauts de cette pile se retrouvent sur d'autres types de pile. [Ss13]

I-9.1. 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 (CO_2 , NO_x) 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-9.2. 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 au 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 penchés sur les piles à combustible. On à parler de l'historique du développement de celles pile à combustible, leur principe de fonctionnement et la structure de ses systèmes.

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

Pour synthétiser un peu ce que nous avons dit dans le début on commence par Les différents types de piles à combustible ensuite nous avons vus Les piles à combustible de type PEM on poursuit juste ça avec l'étude simple de Système pile à combustible PEM Concernant l'utilisation de ce service y'aura Applications des piles à combustible et sans oublié bien sûr Modélisation de la pile à combustible à la fin comme y'a des avantages y'aura aussi des inconvénients donc on découvre les Avantages et inconvénients des piles à combustible de type PEM .

II.1.Introduction :

Les moyens classiques de stockage d'énergie électrique sont d'une part les piles ou accumulateurs, qui permettent une autonomie relativement élevée, mais sont de puissances spécifiques modérées, et d'autre part les condensateurs réputés pour leur forte puissance spécifique mais n'autorisant pas des autonomies de fonctionnement suffisantes pour développer des applications nécessitant un peu d'énergie. Il existait donc un manque, en termes de moyen de stockage d'énergie de forte puissance, se situant entre les batteries et les condensateurs.

Dans ce contexte, les supercondensateurs ont d'abord été développés par des entreprises japonaises vers la fin des années 70, pour des applications de l'électronique du signal. L'idée fut ensuite reprise aux Etats Unis et en Europe à partir du milieu des années 80, pour des applications de l'électronique de puissance, dans le cadre de recherches militaires. On assiste depuis quelques années à une orientation marquée vers les applications civiles, notamment via la mise sur le marché de dispositifs de forte puissance.

Nous aborderons dans ce chapitre les aspects technologiques associés à ces composants de stockage d'énergie. Nous présenterons ensuite la physique des phénomènes régissant le stockage de charges dans ces composants, ainsi que quelques modèles comportementaux. On verra un état de l'art sur la conception et la réalisation de supercondensateurs, sur les caractéristiques des principaux dispositifs commercialisés, nous parlerons aussi de certaines applications potentielles. Enfin ce chapitre nous conclurons par les avantages et les inconvénient des supercondensateurs. [MA04]

II.2.Principe de fonctionnement :

L'expression de la capacité C d'un condensateur dont les armatures en regard sont planes (figure II.1) est classiquement donnée par :

$$(II.1) \quad C = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \frac{S}{d}$$

Avec ϵ_0 la permittivité du vide, ϵ_r la permittivité relative du diélectrique, S la surface de chaque électrode et d l'épaisseur du diélectrique.

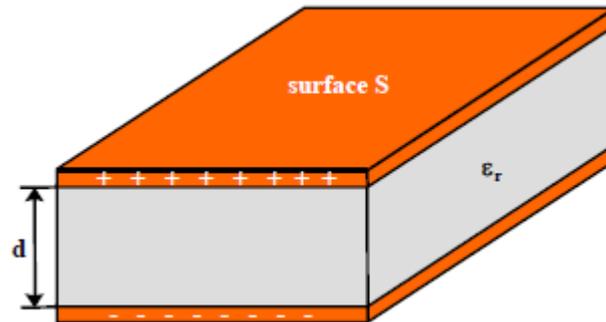


Fig.II.1: Condensateur plan

L'énergie emmagasinée, proportionnelle au carré de la différence de potentiel V entre les électrodes, s'exprime par :

$$(II.2) \quad E = \frac{1}{2} \cdot C \cdot V^2$$

La capacité C étant constante. Les relations (1.1) et (1.2) montrent qu'il existe deux approches permettant d'accroître la capacité d'un tel dispositif, et par là-même la quantité d'énergie stockée :

- la première porte sur l'utilisation de diélectriques possédant une permittivité relative élevée et une tension de service importante,

- la seconde, à l'origine du développement des supercondensateurs, est basée sur l'accroissement du rapport S/d par le recours à des diélectriques très minces et à des armatures gravées présentant d'importantes surfaces.

Les condensateurs électrolytiques offraient jusqu'à présent les plus fortes capacités, typiquement quelques milli farads, obtenus par dépôt d'une couche très mince de diélectrique (film d'oxyde d'aluminium dans le cas de condensateurs électrolytiques à aluminium) sur l'électrode positive gravée. L'électrode négative ne sert, quant à elle, que de liaison entre l'électrolyte et le circuit extérieur.

La technologie des supercondensateurs a révolutionné la famille des condensateurs. Avec des capacités atteignant les milliers de farads, elle dépasse largement toute autre technologie. La différence fondamentale avec la technologie électrolytique réside dans l'absence apparente de couche diélectrique (figure II.2).

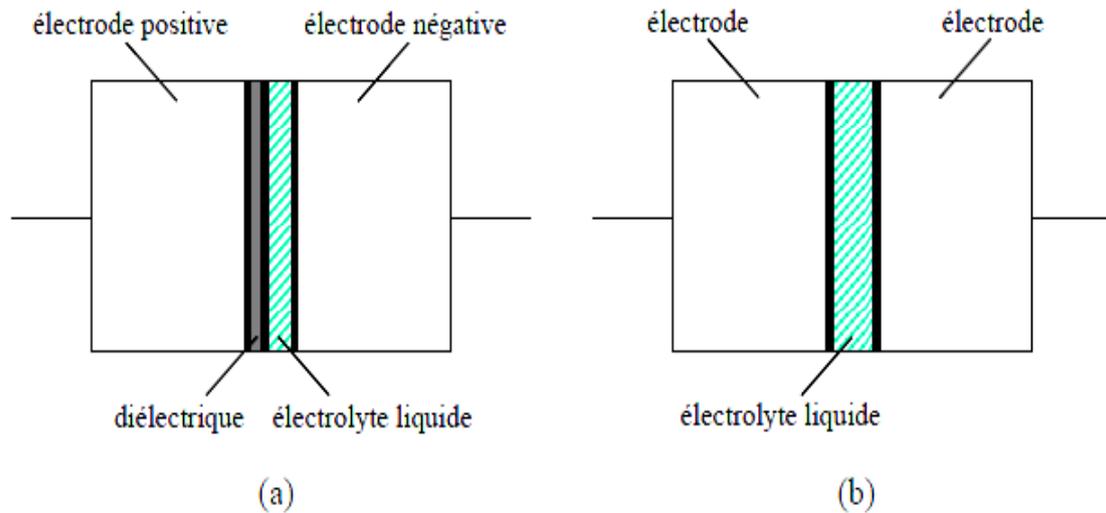


Fig.II.2 : Condensateur électrolytique (a) et supercondensateur (b)

En effet, le principe de base des supercondensateurs repose sur les propriétés capacitives de l'interface entre conducteur électronique solide et conducteur ionique liquide, propriétés découvertes par le physicien Hermann von Helmholtz en 1853. Le stockage d'énergie s'effectue par distribution des ions de l'électrolyte, au voisinage de la surface de chaque électrode, sous l'influence électrostatique de la tension appliquée. Il se crée ainsi aux interfaces une zone de charge d'espace appelée couche double électrique, d'épaisseur limitée à quelques nanomètres. Quant à la fonction diélectrique, elle est assurée par les molécules du solvant de l'électrolyte.

Un supercondensateur peut donc être schématisé par deux capacités représentatives des charges stockées, connectées en séries par le biais d'une résistance associée à l'électrolyte (figure II.3, contrairement au condensateur électrolytique où l'effet capacitif n'est développé qu'à l'anode).

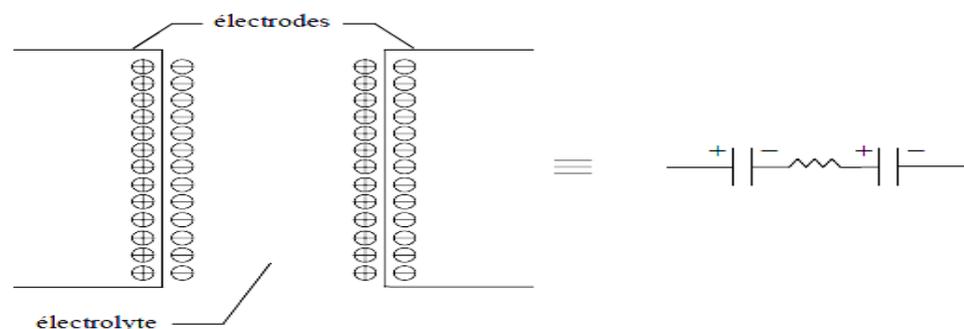


Fig.II.3 : Principe de développement des supercondensateurs

Pour exploiter au mieux les potentialités de cette couche double électrique en termes d'énergie spécifique et de capacité volumique, il convient d'accroître la surface de contact entre électrode et électrolyte sans augmenter outre mesure le volume total de l'ensemble. On a recours pour ce faire à des matériaux d'électrodes poreux de très grande surface spécifique, comme le charbon actif qui présente des surfaces spécifiques supérieures à $1000 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ (figure II.4).

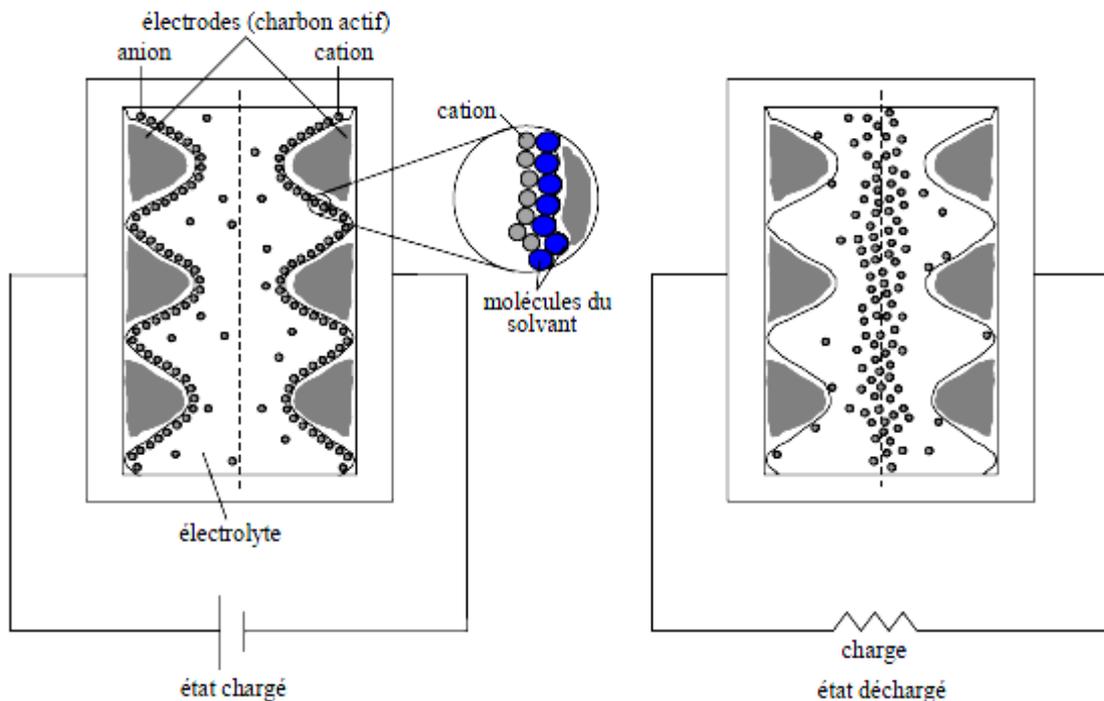


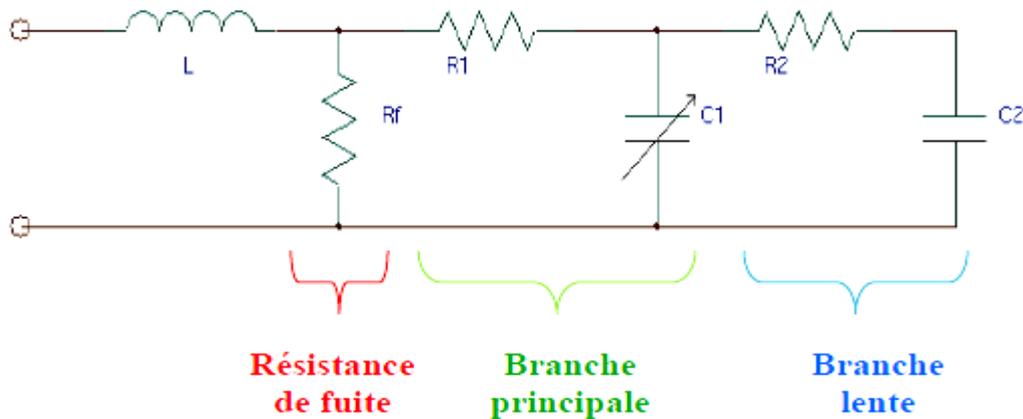
Fig.II.4 : Structure interne des supercondensateurs à couche double électrique

Notons donc deux caractéristiques importantes des supercondensateurs, conséquences du principe de stockage d'énergie électrostatique par couche double électrique : leur réversibilité en tension, bien que ces dispositifs soient fournis avec un sens de polarisation, et leur faible tenue en tension, limitée à quelques volts (par cellule élémentaire), suivant la nature du solvant électrolytique. L'énergie spécifique des supercondensateurs, typiquement de $5 \text{ Wh} \cdot \text{kg}^{-1}$, reste néanmoins nettement supérieure à celle des condensateurs électrolytiques classiques, conséquence de valeurs de capacité extrêmement élevées. Toutefois, pour la plupart des applications d'électronique de puissance, cette limitation sévère en tenue en tension rend incontournables la mise en série et les différents problèmes associés (équilibrage, mise en parallèle, ...). [FB01]

II.3. Modélisation comportementale des super-condensateurs :

II.3.1. Modélisation des super-condensateurs :

On peut modéliser assez simplement un super-condensateur par le modèle suivant :



La cellule représentée par la branche principale R_1 - C_1 détermine l'évolution de l'énergie pendant les cycles de charge et décharge.

La branche R_2 - C_2 est la branche lente qui intervient lors du phénomène de redistribution des charges internes du composant intervenant à la fin de la charge (ou décharge).

Une inductance L (de quelques nH) peut être ajoutée en série et représente la « limitation » en fréquence du composant mais elle peut être négligée dans la plupart des applications.

La capacité C_1 varie en fonction de la tension présente à ses bornes : nous avons

$$C_1 = C_0 + C_v (V_1).$$

La résistance R_1 est la résistance série du composant ; en pratique est de l'ordre de 1mW pour des « gros » supercondensateurs.

La résistance R_f est la résistance de fuite du composant ; elle symbolise l'autodécharge du supercondensateur (de l'ordre de plusieurs kW).

La détermination des paramètres du modèle équivalent d'un supercondensateur se fait par une charge à courant constant du composant. On obtient la courbe suivante :

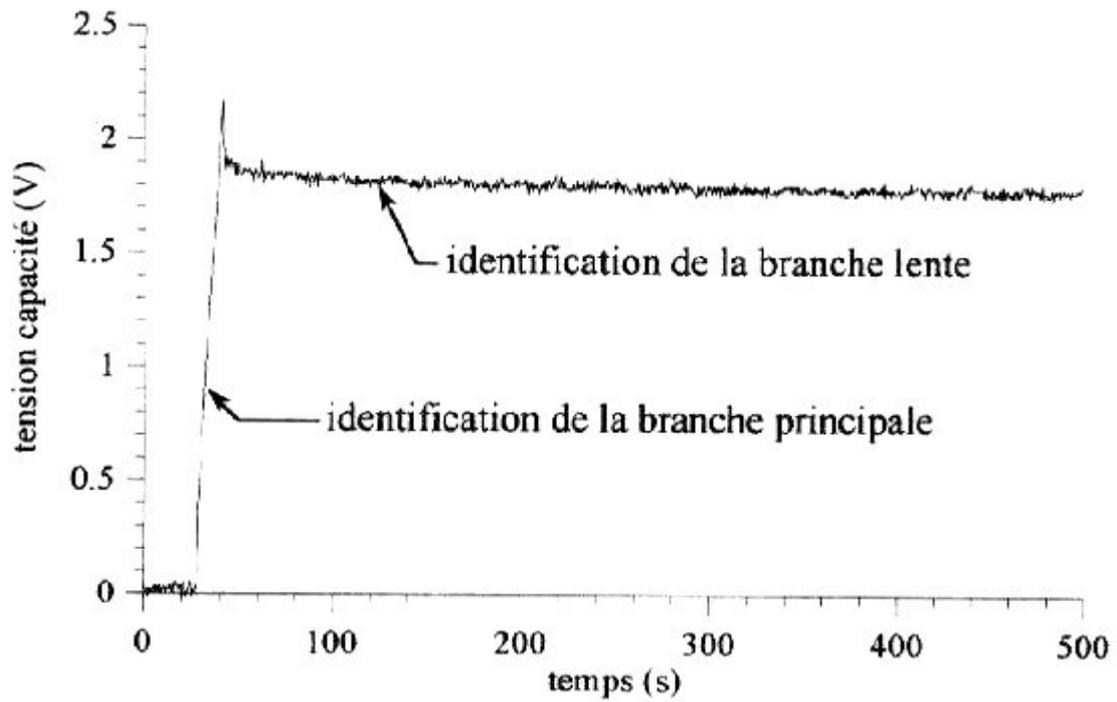


Fig.II.5 : Modèle des super condensateurs à deux branches RC.

C'est R. Bonert et L. Zubieta qui avaient présenté le premier véritable modèle des super condensateurs de puissance, Fig.II.6 Ce modèle à deux branches RC.

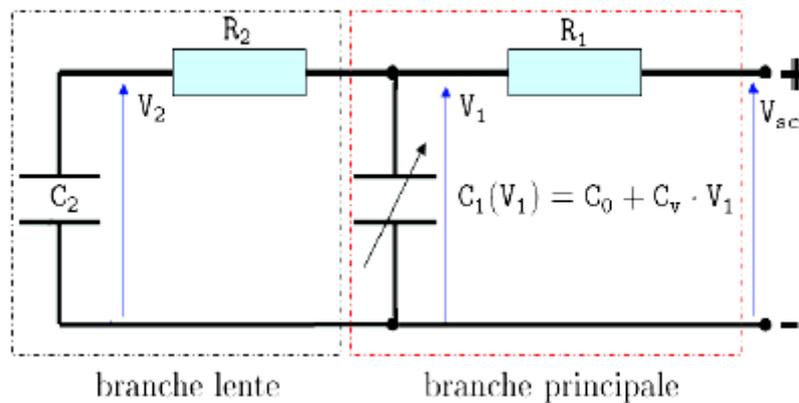


Fig.II.6 : Modèle de R. Bonert et L. Zubieta

Repose sur la partition de l'énergie électrostatique des supercondensateurs en deux :

- énergie rapidement stockée
- énergie lentement stockée.

Et comporte par conséquent deux cellules (Fig.II.6) :

- la première, dite principale, rend compte de l'évolution de l'énergie durant les événements de charge ou de décharge, et correspond aux premières cellules RC d'un modèle à constantes réparties.
- la deuxième, dite lente, vient en complément de la première pour décrire la redistribution interne de l'énergie après lesdits événements, et correspond aux dernières cellules RC d'un modèle à constantes réparties.

Comme le montre la figure ci-dessus, et de façon à tenir compte, d'une part de la nature distribuée de la charge stockée, d'autre part de la non-linéarité physique des capacités développées par les interfaces électrode-électrolyte, la capacité de la branche principale est choisie variable en fonction de la tension à ses bornes. Par ailleurs, et dans un souci de simplicité, la loi de variation adoptée est linéaire :

$$C_1 (V_1) = C_0 + K_V \cdot V_1 \quad (\text{II.3})$$

La capacité C2 de la branche lente devrait théoriquement répondre du même choix, mais nous verrons qu'une capacité constante, bien plus aisée à identifier, suffit amplement pour décrire le phénomène de redistribution interne de l'énergie. Au demeurant, il peut être fait appel à une troisième branche pour une précision accrue dans les temps très longs.

II.3.2.Modèle d'une cellule sans branche lente :

En négligeant la branche lente du modèle de R. Bonert et L. Zubieta, Fig.II.7, le modèle du supercondensateur devient équivalent à la branche principale, Fig.II.7 Pour une cellule, la résistance R1 correspond à la résistance interne (ESR) du composant et la capacité C1(V1) renferme deux composantes. La première C0, est constante et la seconde $k_v \cdot V_1$, est variable en fonction de la tension aux bornes de la capacité.

Ce modèle, bien que simplifié, s'avère être suffisant dans notre étude de commandes du convertisseur, pour retranscrire de manière satisfaisante le comportement du système. [SS13]

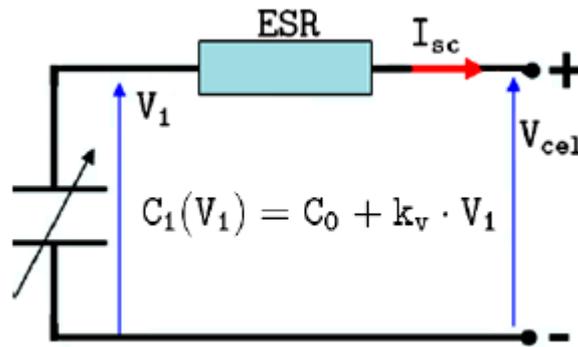


Fig.II.7 : Modèle de la cellule sans branche lente

II.4.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 haute 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.4.1.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.4.2. Alimentations de secours :

En raison de l'augmentation de la densité d'énergie, les supercondensateurs pourraient pour des moyennes et faibles puissances (inférieure à 10 kW) remplacer efficacement les accumulateurs au plomb dans les alimentations de secours, schématiquement constituées d'un chargeur, d'un élément de stockage d'énergie (l'élément typique est l'accumulateur au plomb), d'un onduleur et d'un dispositif actionnant le passage automatique sur l'alimentation de secours en cas de défaillance du réseau (figure II.8).

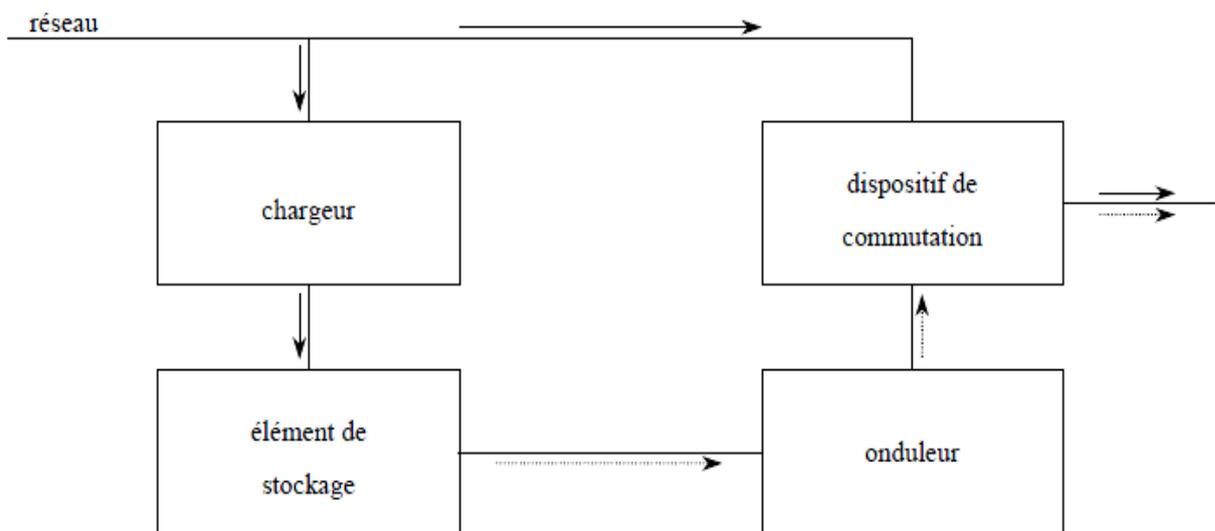


Fig.II.8 : Topologie d'une alimentation sans interruption

En forte puissance (>100 kW), les dispositifs de stockage d'énergie comme les SMES sont compétitifs avec les batteries, mais en faible puissance (< 10 kW), les batteries constituent jusqu'à présent le meilleur élément de stockage d'énergie. Pour cette gamme de puissance, les nouveaux supercondensateurs peuvent remplacer les accumulateurs à plomb dont les

inconvénients majeurs sont une durée de vie limitée (de deux à quatre années), des possibilités de défaillance brutale, un suivi difficile de leur état de charge et un coût de maintenance relativement élevé (le remplacement de la batterie coûte pratiquement 30 % du prix original de l'alimentation).

L'utilisation d'un banc de supercondensateurs nécessite toutefois de réguler, par une conversion continu-continu, la tension d'entrée de l'onduleur, afin de compenser la décharge des supercondensateurs (figure II.9).

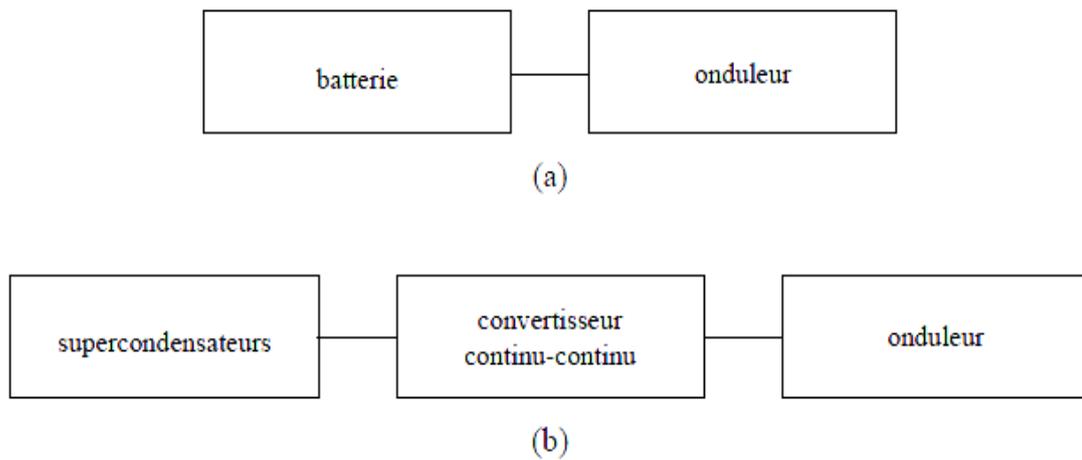


Fig.II.9 : Circuit de secours avec :

(a) une batterie comme source d'énergie

(b) des supercondensateurs comme source d'énergie

II.4.3.Secteur automobile :

Le secteur automobile dans son ensemble, et le véhicule électrique en particulier, constitue un terrain fertile pour l'utilisation des supercondensateurs. Siemens-Matsushita et Saft estiment que ce secteur sera le premier marché véritablement de volume pour les supercondensateurs. Dans les véhicules à moteur thermique, on pourra trouver avantage à coupler un banc de supercondensateurs à la batterie de bord pour répondre aux appels de puissance de certains organes : démarreur, système de préchauffage des pots catalytiques, suspension active, direction assistée.

Quant aux véhicules électriques, les sources d'énergie utilisées jusqu'à présent ne permettent pas d'atteindre un niveau de performances élevé. Les batteries de traction sont, dans ces conditions, dimensionnées en terme d'énergie indispensable pour l'obtention des performances souhaitées, notamment en autonomie, et en terme de puissance de pointe nécessaire pour les phases d'accélération ou de dépassement, ce qui se révèle être une contrainte sévère et pénalisante. Les constructeurs de batteries n'étant pas très optimistes sur une évolution rapide des performances de leurs produits, il était intéressant de réfléchir à des solutions mettant en oeuvre une source d'énergie auxiliaire.

Parmi les solutions technologiques possibles, celle faisant appel aux supercondensateurs paraît très intéressante, non seulement en raison des caractéristiques de ces composants dont nous avons fait mention auparavant, mais de surcroît parce que le stockage d'énergie est statique, et que ladite énergie est d'une part prête à l'emploi, et d'autre part aisément contrôlable par conversion électronique de puissance. (La figure II.10) montre une des configurations permettant l'intégration de super-condensateurs dans un véhicule électrique.

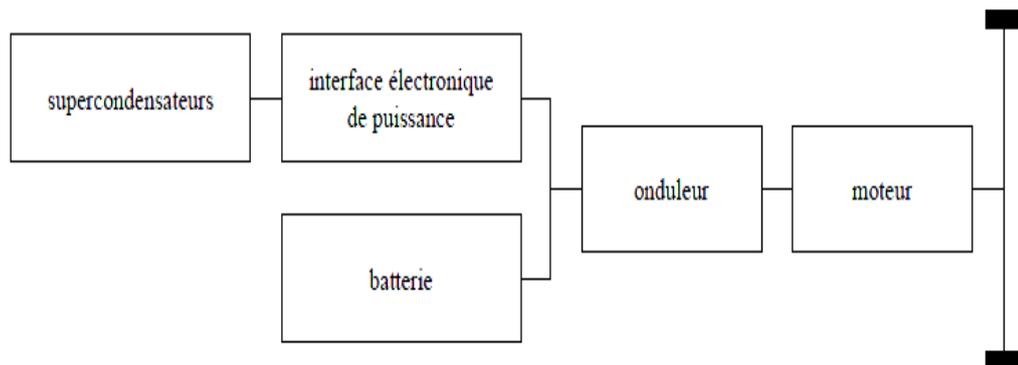


Fig.II.10 : Topologie d'une motorisation de véhicule électrique alimentée par source hybride à supercondensateurs

Les avantages apportés par les supercondensateurs sont nombreux : augmentation de la puissance disponible, de l'autonomie et de la durée de vie des batteries, récupération efficace de l'énergie au freinage, etc... Il faut tout de même garder à l'esprit que si cette utilisation demande une interface électronique pour gérer l'intervention des supercondensateurs, celle-ci a un rendement et un coût qui peuvent devenir un obstacle majeur.

II.5. Les avantages et les inconvénients des super-condensateurs :

II.5.1. Les Avantages :

- ❖ 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.5.2. Les inconvénients :

- ❖ 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.
- ❖ Coût. [Ss13]

II.6.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}).

III.1.Introduction :

Ce chapitre est dédié à la commande d'une source hybride pile /super capacité 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 basé sur la notion de la platitude.

La deuxième partie concerne les supercondensateurs, connectés via un hacheur de type « buckboost », 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.2.Source embarqué utilisant une Pile à combustible:

Le schéma de principe de l'hacheur survolteur est montré sur la figure 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.[SB10]

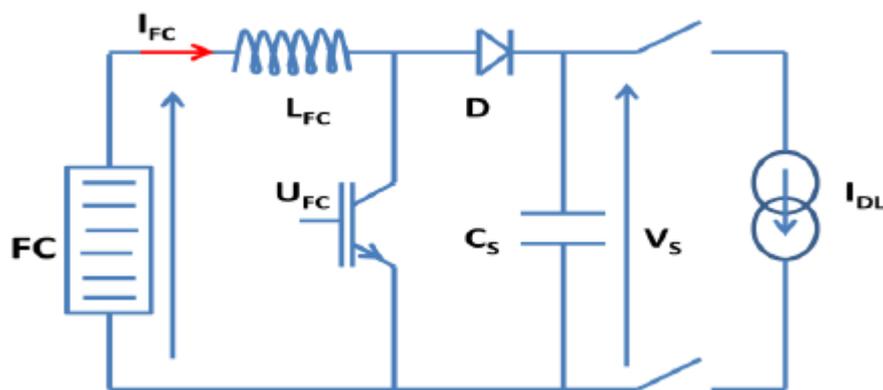


Fig.III.1: Schéma électrique du convertisseur.

III.2.1.Modélisation du hacheur survolteur :

La modélisation de ce convertisseur passe par l'analyse de différentes séquences de fonctionnement selon l'état de l'interrupteur T. Chaque état est représenté par une équation différentielle.

- Lorsque T est fermé :

$$\begin{cases} V_{fc} = L_{fc} \frac{dI_{fc}}{dt} \\ 0 = C_s \frac{dV_s}{dt} + I_{DL} \end{cases} \quad (\text{III.1})$$

-Lorsque T est ouvert :

$$\begin{cases} V_{FC} = L_{fc} \frac{dI_{fc}}{dt} + V_s \\ I_{FC} = C_s \frac{dV_s}{dt} + I_{DL} \end{cases} \quad (\text{III.2})$$

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.

$$\begin{cases} L_{FC} \frac{dI_{FC}}{dt} = V_{FC} - (1 - U_{FC}) \cdot V_s \\ C_s \cdot \frac{dV_s}{dt} = -I_{DL} + (1 - U_{FC}) \cdot I_{FC} \end{cases} \quad (\text{III.3})$$

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 :

$$\begin{cases} \frac{dI_{FC}}{dt} = \frac{V_{FC}}{L_{FC}} - (1 - D) \cdot \frac{V_s}{L_{FC}} \\ \frac{dV_s}{dt} = -\frac{V_s}{RC_s} + (1 - D) \cdot \frac{I_{FC}}{C_s} \end{cases} \quad (\text{III.4})$$

III.2.2. Commande du hacheur survolteur :

Concernant la commande du hacheur survolteur, on a mis en place une commande de type cascade, une régulation du courant dans la bobine par hystérésis et une boucle de régulation basé sur l'approche de platitude.

III.3. Boucle de régulation d'énergie de convertisseur BOOST :

III.3.1. 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 des sources hybrides.

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

$$\dot{x} = f(x, u) \tag{III.5}$$

$$x = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T \quad x \in \mathbb{R}^n \tag{III.6}$$

$$u = [u_1, u_2, \dots, u_m]^T \quad u \in \mathbb{R}^m \tag{III.7}$$

$$h = [h_1, h_2, \dots, h_m]^T \quad h \in \mathbb{R}^m \tag{III.8}$$

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 :

$$h = \varphi(x, u, \dot{u}, \dots, u^{(s)}) \quad (\text{III.9})$$

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 :

$$\begin{cases} x = \phi(h, \dot{h}, \dots, h^{(r)}) \\ u = \psi(h, \dot{h}, \dots, h^{(r+1)}) \end{cases} \quad (\text{III.10})$$

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 [RS13].

III.3.2.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 du système.

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

$$h_1 = \frac{1}{2} C_s v_s^2 \quad (\text{III.11})$$

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

$$v_s = \sqrt{\frac{2h_1}{C_s}} \quad (\text{III.12})$$

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

$$P_1 = P_2 + \dot{h}_1 + r_1 \cdot \left(\frac{P_1}{v_{fc}} \right)^2 \quad (\text{III.13})$$

Ainsi

$$P_1 = 2.P_{fcmax} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{Pch + \dot{h}_1}{P_{fcmax}}} \right) = \Psi(h_1, \dot{h}_1) \quad (\text{III.14})$$

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

$$P_{fcmax} = \frac{v_{fc}^2}{4.r_{fc}} \quad (\text{III.15})$$

$v_s = F_{vs}(h_1)$ et $P_1 = \Psi(h_1, \dot{h}_1) \rightarrow$ Le système est plat.

III.3.3. 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 [MZ65,MZ11].

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 :

$$h_{1ref}(t) = \frac{1}{2} C_s v_{sref}^2(t) \quad (III.16)$$

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

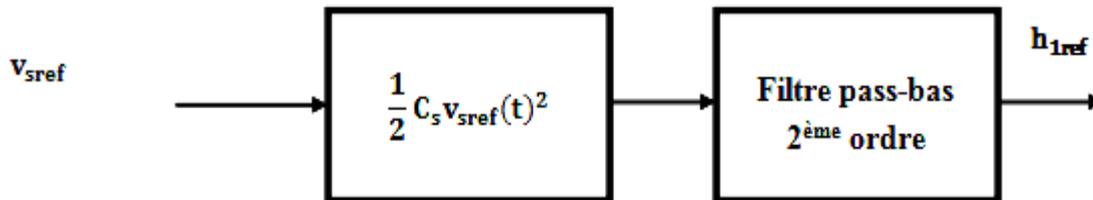


Fig.III.2 : Génération de la trajectoire de référence.

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 la trajectoire de référence pour minimiser les appels de puissances en régime transitoire.

III.4.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.

III.5. Source embarqué utilisant une pile à combustible et des super condensateurs :

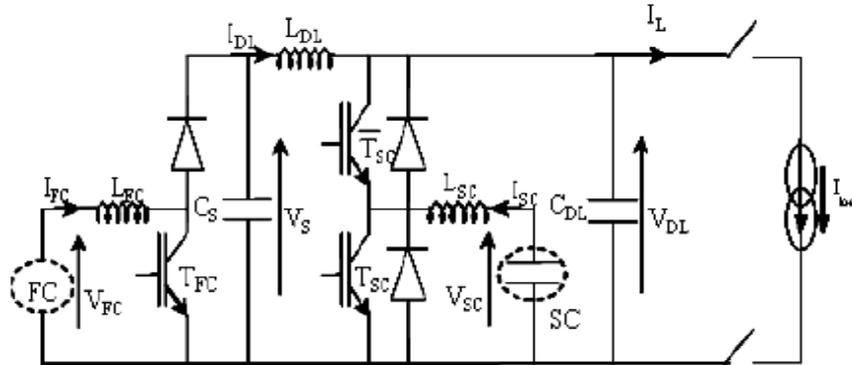


Fig.III.3 : La Structure d'hybride source

III.5.1.Modélisation de système : [Aa05]

$$\left\{ \begin{array}{l} L_{DL} \frac{dI_{DL}}{dt} = (V_S - V_{DL}) - r_{dl} \cdot I_{DL} \end{array} \right. \quad (III.17)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} C_{DL} \frac{dV_{DL}}{dt} = I_{DL} - I_L + I_{SC} (1 - U_{SC}) \end{array} \right. \quad (III.18)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} L_{SC} \cdot \frac{dI_{SC}}{dt} = V_{SC} - (1 - U_{SC}) \cdot V_{DL} - r_{sc} \cdot I_{SC} \end{array} \right. \quad (III.19)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} C_{SC} \cdot \frac{dV_{SC}}{dt} = -I_{SC} \end{array} \right. \quad (III.20)$$

$$U_{SC} = 1 \Rightarrow \begin{cases} T = 1 \\ \bar{T} = 0 \end{cases} \quad \text{and} \quad U_{SC} = 0 \Rightarrow \begin{cases} T = 0 \\ \bar{T} = 1 \end{cases}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} L_{FC} \cdot \frac{dI_{FC}}{dt} = V_{FC} - (1 - U_{FC}) \cdot V_S - r_{FC} \cdot I_{FC} \end{array} \right. \quad (III.21)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} C_S \cdot \frac{dV_S}{dt} = -I_{DL} + (1 - U_{FC}) \cdot I_{FC} \end{array} \right. \quad (III.22)$$

$$U_{FC} = 1 \Rightarrow \{T = 1 \text{ and } U_{FC} = 0 \Rightarrow \{T = 0$$

III.5.2. Application de la commande mode glissement :

Principe de contrôle du convertisseur DC-DC des supercondensateurs : [SK05, Aa05, MYA07]:

$$S = k_1 \cdot (V_{DL}^* - V_{DL}) + k_2 \cdot (I_{SC} - I) \quad (III.23)$$

$$I = k_{ps} \cdot (V_{SC} - V_{SC}^*) + k_{is} \cdot \int_0^t (V_{SC} - V_{SC}^*) \cdot dt \quad (III.24)$$

Avec :

$$U = U_{SC} \quad (III.25)$$

$$X = [V_{DL} \quad I_{SC} \quad V_{SC} \quad I]^T$$

Le système d'équation globale peut être écrit comme suit :

$$\dot{X} = AX + BU + C + \xi \quad (III.26)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{V}_{DL} = \frac{I_{DL}}{C_{DL}} - \frac{I_L}{C_{DL}} + \frac{I_{SC}}{C_{DL}} (1 - U_{SC}) \end{array} \right. \quad (III.27)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{I}_{SC} = \frac{V_{SC}}{L_{SC}} - (1 - U_{SC}) \frac{V_{DL}}{L_{SC}} - \frac{r_{SC}}{L_{SC}} I_{SC} \end{array} \right. \quad (III.28)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{V}_{SC} = -\frac{I_{SC}}{C_{SC}} \end{array} \right. \quad (III.29)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{I} = -\frac{K_{PS}}{C_{SC}} I_{SC} + K_{IS} (V_{SC} - V_{SC}^*) \end{array} \right. \quad (III.30)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1/C_{DL} & 0 & 0 \\ -1/L_{SC} & -r_{SC}/L_{SC} & 1/L_{SC} & 0 \\ 0 & -1/C_{SC} & 0 & 0 \\ 0 & -k_{ps1}/C_{SC} & k_{is1} & 0 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} -I_{SC} & V_{DL} & 0 & 0 \\ C_{DL} & L_{SC} & 0 & 0 \end{bmatrix}^T$$

$$\xi = \begin{bmatrix} I_{DL} - I_L & 0 & 0 & 0 \\ C_{DL} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T \quad C = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -k_{is} V_{SC} \end{bmatrix}^T$$

Si nous notons :

$$G = [K_1 \quad K_2 \quad 0 \quad -K_2] \quad (III.31)$$

La surface de glissement est donnée par:

$$S = C_{DL} \xi + GX \quad (III.32)$$

$$\dot{S} = -\lambda S - K \text{sign}(s) \quad (III.33)$$

Avec :

$$K = 0 \quad \text{Si } \|S\| < \varepsilon \quad (III.34)$$

$$K = n\lambda\varepsilon \quad \text{Si } \|S\| > \varepsilon \quad (III.35)$$

Le terme linéaire $-\lambda s(x)$ impose la dynamique à l'intérieur de l'erreur de la bande passante ε . Le choix d'une grande valeur de $\lambda (\leq fc/2)$ assure une petite erreur statique lorsque $\|S\| < \varepsilon$. Le terme non-linéaire $-K \text{sign}(s)$ permet le rejeter des effets de perturbations (incertitude du modèle, les variations des conditions de travail). Ce terme permet de compenser les valeurs élevées d'erreur $\|S\| < \varepsilon$ dues aux perturbations mentionnées ci-dessus. Le choix d'une petite valeur de ε entraîne à une élévation de l'ondulation du courant (effet de chattering), mais l'erreur statique reste faible. Une valeur élevée de ε oblige à réduire la valeur de λ pour assurer la stabilité du système et conduit à une erreur statique supérieure.

Une fois les paramètres (λ , K , ϵ) de la loi de portée sont déterminés, il est possible de calculer le contrôle continu équivalent, qui permet de maintenir la trajectoire d'état sur la surface de glissement. Nous utilisons l'équation (III.27), (III.33) et (III.34), nous trouvons pour le premier système:

$$U_{S_{Ceq}} = (GB)^{-1} \left\{ -GAX - GC - \lambda GX - K \text{sign}(S) - C_{DL} \left[\dot{\xi} + \lambda \xi \right] \right\} \quad (III.36)$$

(III.26) et (III.36) donnent l'équation suivante :

$$A_{eq} = A - GA - B (GB)^{-1} \lambda G \quad (III.37)$$

Pour calculer les constants K_1 et K_2 on utilise le calcul des valeurs propres de l'équation suivante :

$$\lambda I - A_{eq} = 0 \quad (III.38)$$

III.5.3. Le schéma de simulation :

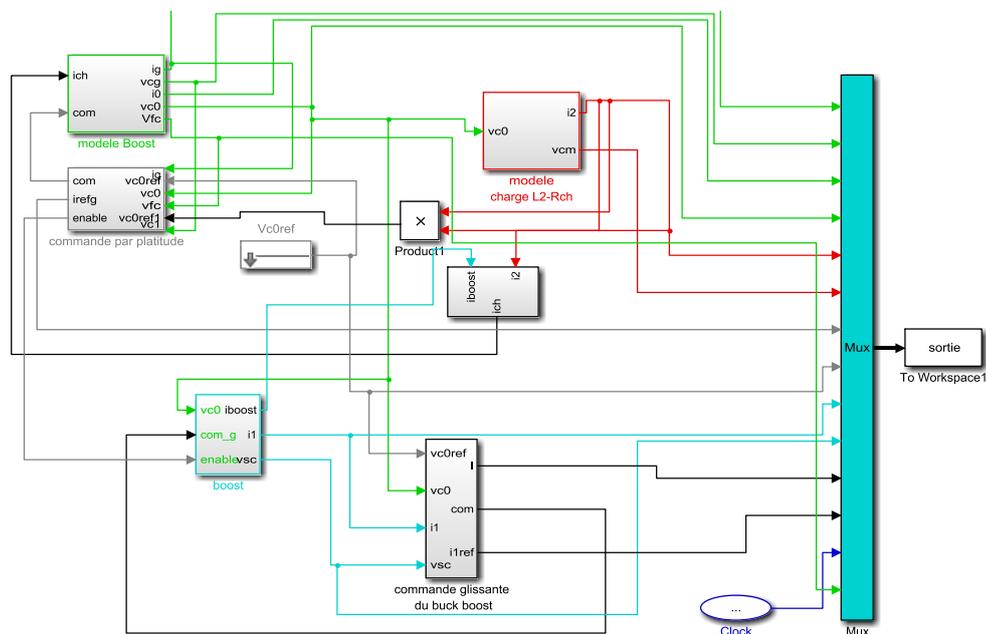


Fig.III.4 : MATLAB/Simulink modèle de la PEM avec BOOST convertisseur

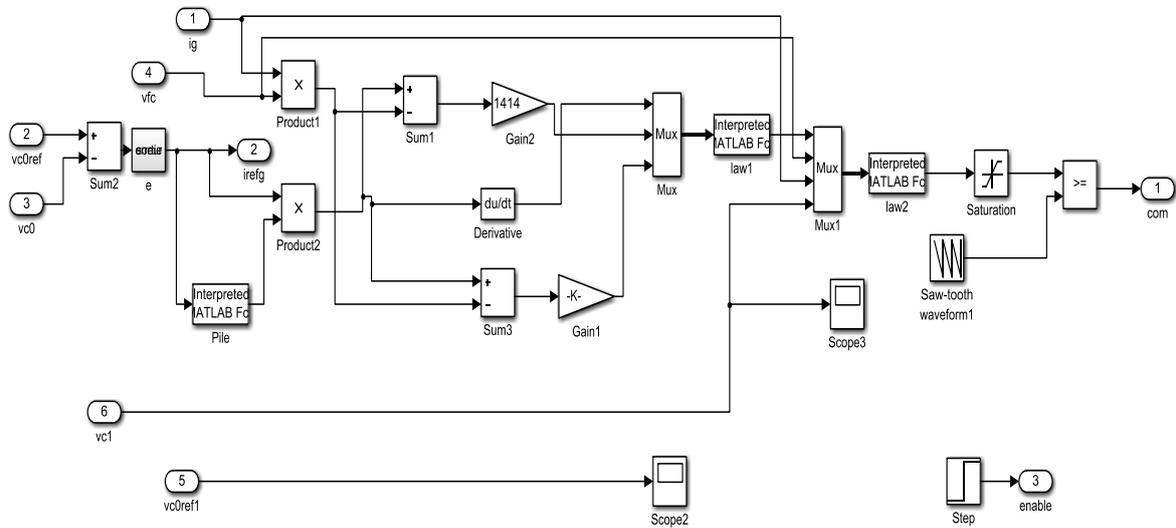


fig.III.5 :Schéma de simulation de la commande par platitude

III.5.4. Les résultats de simulation :

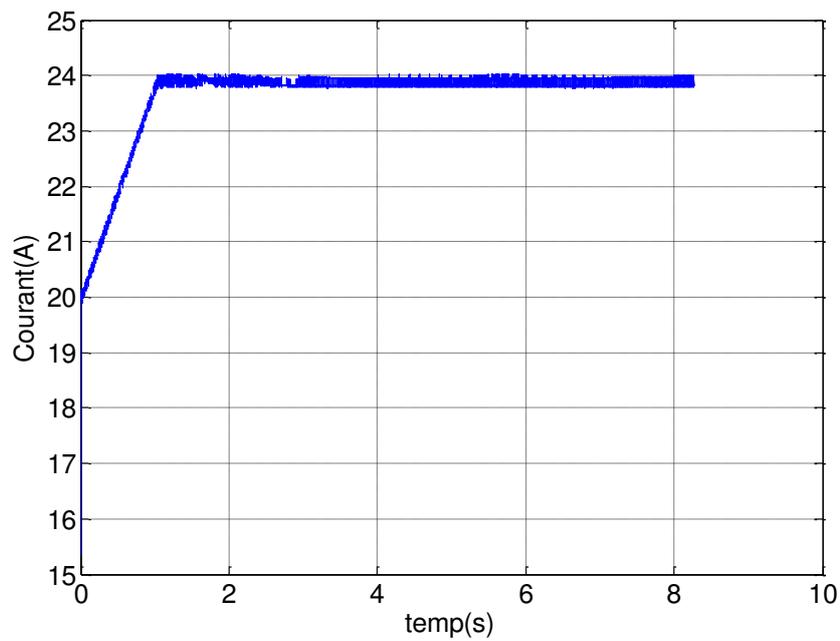


fig.III.6 : le courant du générateur

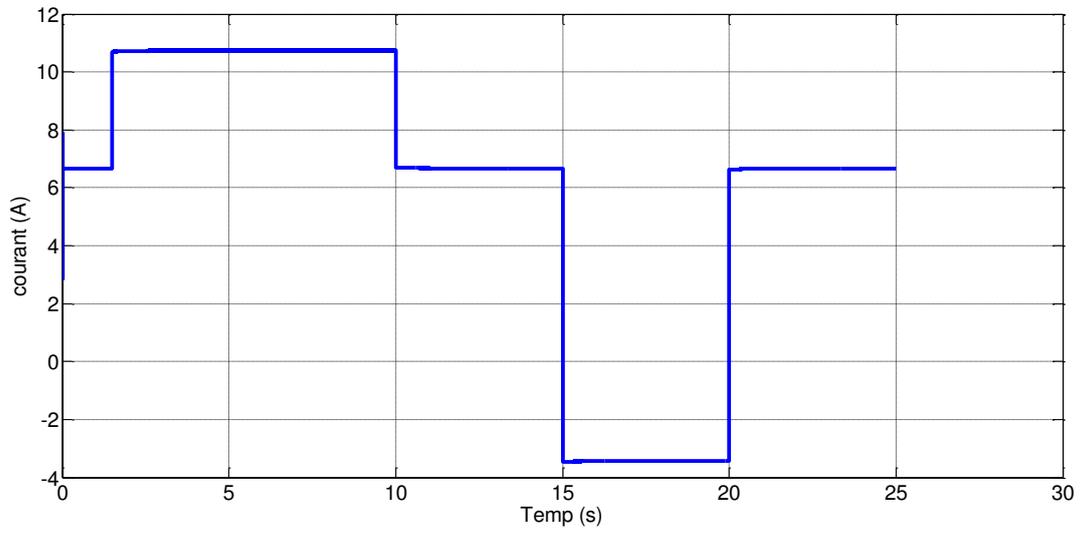


Fig .III.7 : Le courant de la charge

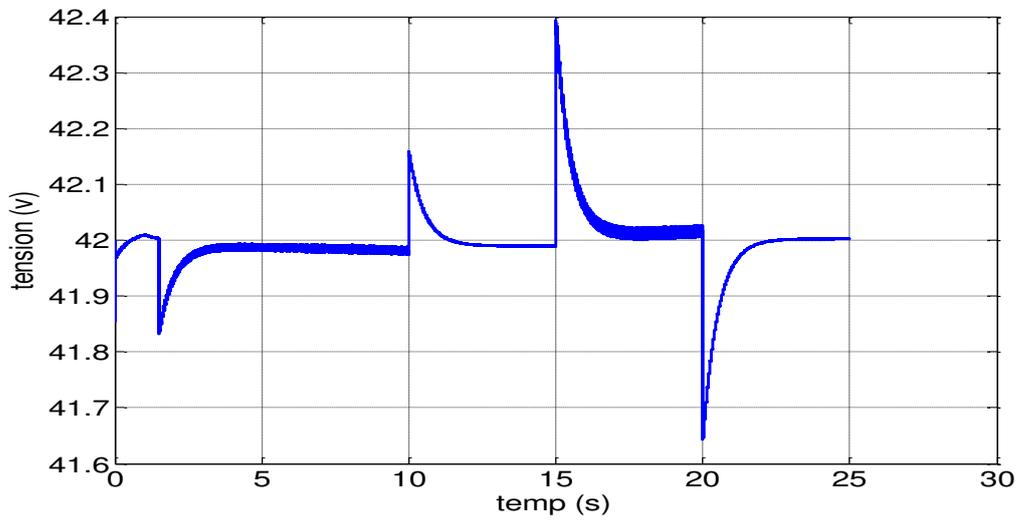


Fig .III.8 : La tension du bus continu et la référence de cette tension

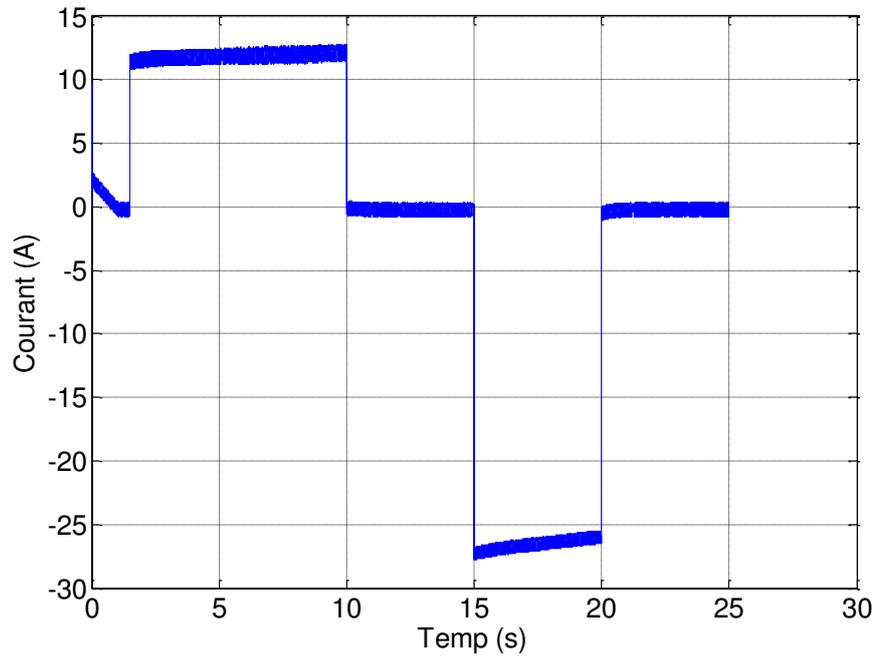


Fig .III.9 : Le courant du supercondensateur

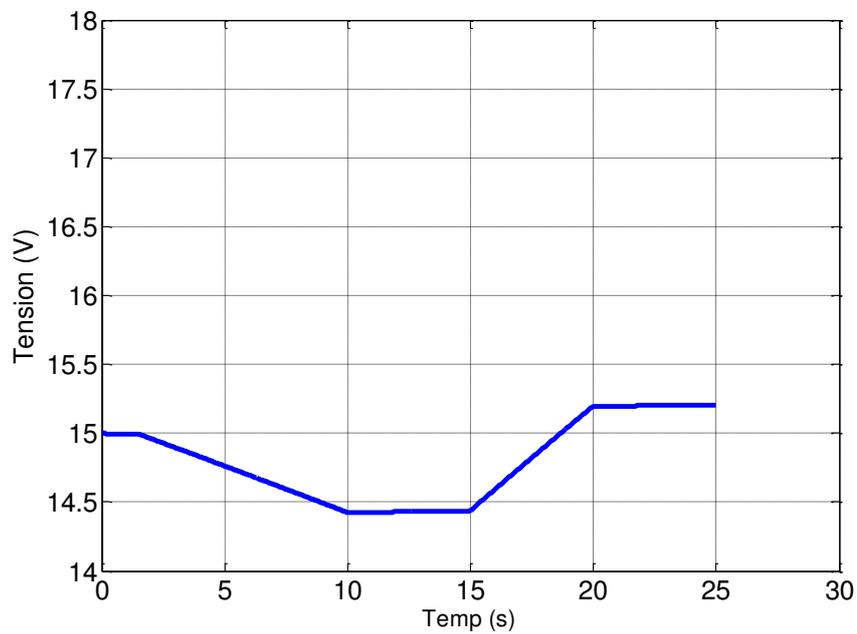


Fig .III.10 : La tension du supercondensateur

III.5.5. Interprétation des résultats :

Dans la figure III.6, est présenté le courant du générateur, qui est constant quelque soit les variations de la charge.

La figure III.7 présente la variation de courant en fonction de temps avec les différents scénarios possible $I > I_{fc}$, $I < 0$, $I < I_{fc}$

Dans la figure III.8, sont présentées la tension du bus continu, 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.9, est présenté le courant de la supercapacité ; On remarque que dans l'intervalle du temps $2,5s < t < 10s$ le courant de la charge devient supérieure à le courant du générateur, ceci est dû à la décharge de la supercapacité supposée déjà chargée (à $t=0$ $V_{sc}=15V$); afin de maintenir constante la tension du bus contenu. Et dans l'intervalle du temps $15s < t < 20s$ la différence entre la puissance de la charge et celle du générateur est récupérée pour recharger la supercapacité.

Dans la figure III.10, 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.

III.5.6. Les paramètres :

Initialisation et paramètres de charge RLE				
V_{SC} [V]	V_{DL} [V]	R_L [Ω]	L [mH]	E [V]
$t=0s, V_{SC} = 15$ V	24	10	10	20

Supercondensateurs et paramètres de liaison DC		
C_{SC} [F]	C_{DL} [mF]	C_S [mF]
3500/6	15	300

III.6. Conclusion :

L'objectif principal de cette étude était la modélisation, la simulation 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 :

[Stmz] : S. 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://education.lanl.gov/resources/fuelcells/fuelcells.pdf>.

[Bc02] : B. Cook, “An introduction to fuel cells and hydrogen technology,” Engineering Science and Education Journal, vol. 11, n° 6, pp. 205- 216 , décembre 2002.

[Maj04] : M. A. J. Cropper, S. Geiger et D. M. Jollie, “Fuel cells: a survey of current developments,” Journal of Power Sources, vol. 131, n° 1-2, pp. 57-61 mai 2004.

[RT09] : thèse de doctorat par Reine TALJ , faculté des sciences d’orsay- université de paris - sud 11, soutenu le 15octobre 2009.

[RSG01] : 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.

[Fre01] : Tatiana J.P. Freire, Ernesto R. Gonzalez, ”Effect of membrane characteristics and humidification conditions on the impedance response of polymer electrolyte fuel cells”, Journal of Electroanalytical Chemistry 503 (2001) 57-68.

[Büc97] : Felix N. Büchi, Supramaniam Srinivasan, ”Operating Protons Exchange Membrane Fuel Cells Without External Humidification Of the Reactant Gases”, Journal of Electrochemical Society, vol. 144, N° 8, August 1997, pp. 2767-2772.

[Atk04] : J.R. Atkins, S.C. Savett, S.E. Creager, ”Large-scale current fluctuations in PEM fuel cells operating with reduced feed stream humidification”, Journal of Power sources, 128 : 201-207, 2004.

[Maz 05] : Philippe Mazabraud, ”Le stockage embarqué de l’Hydrogène”, Clefs CEA, L’hydrogène, les nouvelles technologies de l’énergie, Hiver 2004-2005. N°50/51, ISSN 0298-6248.

[Lee00] : Seung Mi Lee et al, ”Hydrogen adsorption and storage in carbon nanotubes”, Synthetic metals, Pages 209-216, 2000.

[Los02] : Vasil Losub et al, “stockage de l’hydrogène sur hydrures métalliques pour pile à combustible stationnaires”, Matériaux, 2002.

[Asc03] : Anne-Sophie Corbeau. Les piles à combustibles. <http://www.annso.freesurf.fr/liens.html>, Décembre 2003.

[Cor03] : J. M. Corrêa, F. A. Farret, L. N. Canha et M. G. Simões, “Simulation of fuel-cell stacks using a computer-controlled power rectifier with the purposes of actual high-power injection applications,” IEEE Trans. on Industrial Applications, vol. 39, n° 4, pp. 1136 – 1142, juillet-août 2003.

[Sad04] : I. Sadli, P. Thounthong, J-P. Martin S. Raël et B. Davat, "Behaviour of a protons exchange membrane fuel cell (PEMFC) supplying a low voltage static converter," 2nd France – Deutschland Fuel Cell Conference (FDFC2004), Belfort (France), 29 novembre-2 décembre 2004.

[Els04] : M.Y. El-Sharkh, A. Rahman, M. S. Alam, P. C. Byrne, A. A. Sakla, et T. Thomas, "A dynamic model for a stand-alone PEM fuel cell power plant for residential applications," Journal of Power Sources, vol. 138 , pp. 199-204n° 1-2, novembre 2004.

[Lee98] : J. H. Lee, T. R. Lalk et A. J. Appleby, "Modeling electrochemical performance in large scale proton exchange membrane fuel cell stacks," Journal of Power Sources, pp. 258-268vol. 70, n° 2, février 1998.

[Iqb03] : M. T. Iqbal, "Modeling and control of a wind fuel cell hybrid energy system," Renewable Energy, pp. 223-237 vol. 28, n° 2, février 2003.

[Cor04] : J. M. Corrêa, F.A. Farret, L.N. Canha et M. Godoy Simões, "An electrochemicalbased fuel cell model suitable for electrical engineering automation approach," IEEE Trans. on Industrial Electronics, pp. 1103 – 1112 vol. 51, n° 5, octobre 2004.

[Ss13] : thème de magister, saker samah, « modélisation et contrôle du système pile a combustible, convertisseur, et super condensateur », juin 2013

[MA04] : Mohamed-Yacine AYAD « mise en oeuvre des supercondensateurs dans les sources hybrides continues » l'Institut National Polytechnique de Lorraine, soutenu le 03 décembre 2004.

[FB01] : F.BELHACHEMI, « Modélisation et caractérisation des supercondensateurs à couche double électrique utilisés en électronique de puissance », thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, 2001.

[SB10] : S.BELKEHAL, « Conception & Commande Des Machines à Aimants Permanents Dédiées aux Energies Renouvelables », Doctorat de l'Université De Constantine, 2010

[MF92] : M. Fliess, J. Lévine, P. Martin, and P. Rouchon, "Sur les systemes non linéaires différentiellement plats," Comptes rendus de l'Académie des sciences. Série 1, Mathématique, vol. 315, pp. 619-624, 1992.

[MF95] : M. Fliess, J. Lévine, P. Martin, and P. Rouchon, "Flatness and defect of non-linear systems: introductory theory and examples," International journal of control, vol. 61, pp. 1327-1361, 1995.

[RS13] : 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

on the flatness control," in Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG), 2013 Fourth International Conference on, 2013.

[MZ65] : 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. 1360-1365.

[MZ11] : 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.

[SK05]: S. KEDJOITI, C. MESSAOUDI, "Réglage des puissances active et réactive de la génératrice asynchrone à double alimentation par mode glissant, mémoire d'ingénieur d'état, Université Med Boudiaf M'SILA, 2005.

[Aa05] : A. ACHOUR, A.AICHOUCHE ; « Réglage par mode glissant d'une machine asynchrone », Université MOHAMED BOUDIAF, MSILA, 2005.

[MYA07] : M.Y. Ayad, M. Becherif, A. Djerdir and A. Miraoui; "Sliding Mode Control for Energy Management of DC Hybrid Power Sources Using Fuel Cell, Batteries and supercapacitors", International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP'07), Capri, Italy, pp. 500-505, May 2007.