



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

MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies
Electromécanique
Electromécanique

Réf. :

Présenté et soutenu par :
HABIRET Abdelkader – GHADDAB Abdelmadjid

Le :

Etude et simulation d'une source hybride pour les applications véhicule électrique

Jury :

M.	Arif Ali	Pr	Université de Biskra	Président
M.	Guettaf Abderrezak	Pr	Université de Biskra	Examineur
M.	Saadi Ramzi	MCA	Université de Biskra	Rapporteur

Année universitaire : 2021 - 2022



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

MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies
Electromécanique
Electromécanique

Réf. :

Etude et simulation d'une source hybride pour les applications véhicule électrique

Le :

Présenté par :

HABIRET Abdelkader
GHADDAB Abdelmadjid

Avis favorable de l'encadreur :

SAADI Ramzi

Signature Avis favorable du Président du Jury

GUETTAF Abderrezak

Cachet et signature

Remerciement

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Nous remercions Dieu Tout-Puissant de nous avoir donné la force et
Patience pour terminer ce travail.

Nous exprimons notre profonde gratitude au Professeur **Saadi** Ramzi pour avoir pris en charge de nous encadrer, diriger et guider tout au long de ce travail et pour la confiance qu'il nous accorde.

Nous remercions sincèrement tous ceux qui, de près ou de loin, nous ont apporté conseils, soutien et assistance dans la réalisation et la réalisation de ce travail.

Nos sincères remerciements à tous nos enseignants du primaire à l'université.

Dédicaces

A nos parents

Nous tenons à dédier ce travail à nos parents qui ont contribué par tous les moyens disponibles pour notre réussite. Ils ont consenti beaucoup de sacrifices afin de nous voir grandir et ont veillé à réussir dans notre vie. Aujourd'hui, à notre tour de les remercier en leur dédiant ce modeste travail qui est le fruit de leurs sacrifices. Nous leurs souhaitons prospérité et parfaite santé.

A nos frères et sœurs

Nous apprécions beaucoup l'affection que vous nous apportez chaque jour. A cette occasion, nous vous manifestons notre meilleur sentiment en vous dédiant le fruit de notre travail.

A nos amis

Nos dédicaces s'adressent également à tous nos amis(e), à tous ceux qui nous connaissent, et à tous les étudiants de notre promotion.

Résumé

Résumé:

Objectif principale de Ce mémoire de thèse est la résolution du problème de Commande et de la gestion d'énergie dans une source hybride : pile à combustible, super condensateur et Batterie connecté au bus continu. L'adaptation des niveaux de tension entre les sources et la charge dans ce source hybride sera réaliser utilisant deux convertisseurs DC - DC, l'un de type Boost, l'autre Buck / Boost, permettant de fixer la tension du bus continu et transmis le courant demandé par la charge. La commande par mode de glissement a été utilisée pour contrôler les convertisseurs DC – DC de cette source hybride. Les simulations présenté dans ce mémoire montrer la haute performance de la commande utilisée.

Mots clés:

Gestion d'énergie, pile à combustible, super condensateurs, commande par mode de glissement, commande optimale, propulsion électrique

Abstract:

Main objective of this thesis is to solve the problem of control and energy management in a hybrid source: fuel cell, super capacitor and battery connected to dc BUS. The adaptation of the voltage levels between the sources and the load in this hybrid source will be carried out using two DC - DC converters, one of the Boost type, the other Buck / Boost, making it possible to fix the voltage of the DC and transmitted bus the current demanded by the load. Slip mode control was used to control the DC – DC converters of this hybrid source. The simulations presented in this thesis show the high performance of the control used.

Keywords:

Energy management, fuel cell, super capacitors, sliding mode control, optimal control, electric propulsion.

المخلص:

الهدف الرئيسي من هذه الأطروحة هو حل مشكلة التحكم وإدارة الطاقة في مصدر هجين: خلية وقود ومكثف عاليو بطارية متصلة ب DC bus. سيتم تنفيذ تكيف مستويات الجهد بين المصادر والحمل في هذا المصدر الهجين باستخدام محولين DC - DC، أحدهما من نوع Boost، والآخر Buck / Boost، مما يجعل من الممكن إصلاح جهد التيار المستمر و ينقل الحافلة التيار الذي يتطلبه الحمل. تم استخدام التحكم في وضع الانزلاق للتحكم في محولات DC - DC لهذا المصدر الهجين. تظهر عمليات المحاكاة المقدمة في هذه الأطروحة الأداء العالي لعنصر التحكم المستخدم.

الكلمات الدالة: إدارة الطاقة ، خلية الوقود ، المكثفات العالية ، التحكم في الوضع الانزلاقي ، التحكم الأمثل ، الدفع الكهربائي.

Sommaire

Introduction Générale	1
Chapitre I : Généralité sur les piles à combustible.....	2
Introduction	3
I.1) Description générale d'une pile à combustible	3
I.2) Aperçu historique de la pile à combustible	3
I.3) Présentation de la pile à combustible	5
I.4) Principe de fonctionnement	5
I.5) Classification des piles à combustible	6
I.5.1) Pile alcaline (AFC)	7
I.5.2) Pile à membrane à électrolyte polymère (PEMFC)	7
I.5.3) Pile à méthanol direct (DMFC)	8
I.5.4) Pile à acide phosphorique (PAFC)	8
I.5.5) Pile à carbonate fondu (MCFC)	8
I.5.6) Pile à oxyde solide (SOFC)	9
I.6) Domaines d'application	9
I.6.1) Applications dans les transports	9
I.6.2) Applications stationnaire	9
I.6.3) Applications spatial	9
I.6.4) Applications portables	10
I.7) Avantages et inconvénients des piles à combustible	10
I.7.1) Avantages des piles à combustible	10
I.7.2) Inconvénients des piles à combustible	10
I.8) Construction de pile à combustible de type PEM	11
I.8.1) Assemblage membrane-électrodes	11
I.8.1.1) Electrodes	12
I.8.1.2) Electrolyte	12
I.8.1.3) Plaque bipolaire	12
I.8.2) Humidificateur	12
I.9) Système pile à combustible	12
Conclusion	13

Sommaire

Chapitre II: Généralité sur les super condensateurs et les batteries.....	14
Introduction	15
II.1) Principe des super condensateurs	15
II.2) Les différents éléments du super condensateur	16
II.2.1) Electrodes	16
II.2.1.1) Les charbons actifs	16
II.2.1.2) Les tissus actifs	17
II.2.2) L'électrolyte	17
II.2.2.1) L'électrolyte aqueux	17
II.2.3) Le séparateur	17
II.2.4) Collecteur de courant	17
II.3) Applications courantes des super condensateurs	18
II.4) Super condensateurs : avantages et inconvénients	18
II.4.1) Les avantage	18
II.4.2) Les inconvénients	18
II.5) Les différentes familles des Super condensateurs	19
II.6) les batteries	19
II.6.1) Présentation des batteries	19
II.6.2) Types des batteries	19
II.6.3) Grandeurs caractéristiques d'une batterie	20
II.6.4) Liaisons des batteries	20
II.6.4.1) Connexion en série	20
II.6.4.2) Connexion parallèle	21
II.7) Comparaison entre les batteries et les super condensateurs	21
Conclusion	22
Chapitre III : Commande de la source hybride(Pile a combustible / super condensateur /Batterie).....	23
Introduction	24
III.1) Structure des sources	24
III.2) Modélisation des piles à combustible, des super condensateurs et des batteries	25
III.2.1) Modèle de pile à combustible	25

Sommaire

III.2.2) Modèle des super condensateurs	25
III.2.3) Modèle de batterie	26
III.3) Contrôle en mode glissant des sources hybrides	26
III.3.1) Principe de commande du convertisseur DC-DC boost FC	27
III.3.2) Principe de commande du convertisseur DC-DC des super condensateurs	28
III.3.3) Stabilité	30
III.4) Résultats de la simulation du contrôle des sources hybrides	31
III.5) Résultats de la simulation	31
III.6) Interprétation des résultats	35
Conclusion	35
Conclusion générales	36
Bibliographie	37

Liste des figures

1 Chapitre I :

Figure I.1- Expérience de Sir William Grove	3
Figure I.2 - Flèche chronologique de l'historique de la pile à combustible	4
Figure I.3 - Fonctionnement de principe d'une pile à combustible	5
Figure I.4- Différents types de piles à combustible.....	6
Figure I.5 - Schéma d'une cellule de PEMFC.....	7
Figure I.6- Les Application de piles à combustibles	10
Figure I.7 - Pile à combustible de type PEM alimentée en hydrogène et en oxygène	11
Figure I.8 - Différents constituants d'un système pile à combustible.....	13

2 Chapitre II :

Figure II.1 - Schéma de principe des super condensateurs	15
Figure II.2 - différents éléments du super condensateur	16
Figure II.3 - Modèle super condensateur	16
Figure II.4 - Les différentes familles des super condensateurs.....	19
Figure II.5 - Liaison en série des batteries.....	20
Figure II.6- Liaison en série et en parallèle des batteries	21
Figure II.7- Diagramme de RAGONE	22

3 Chapitre III :

Figure III.1 Structure de la source hybride	24
Figure III.2 - Model électrique super capacité	25
Figure III.3 - Model Thevenin	26
Figure III.4 - Circuit de batterie emf et résistance interne.....	26
Figure III.5 - Présentes le contrôle synoptique du premier boost FC hybride.	27
Figure III.6 - Courant de charge I_{DL}	31
Figure III.7 - Tension de Bus continu V_{DL}	32
Figure III.8 - Courant de batterie	32
Figure III.9 - Courant de super capacité	33
Figure III.10 - Tension de super capacité	33
Figure III.11 - Courant de fc	34
Figure III.12 - Tension de fc	34

Abréviations

PAC : Pile à combustible.

MCFC : Pile à combustible à carbonate fondu.

SOFC : Pile à combustible à oxyde solide.

PCFC : Pile à combustible à céramique protonant.

AFC : Pile à combustible alcaline.

DMFC : Pile à combustible à méthanol direct.

PEMFC : Pile à combustible à membrane d'échange de protons.

PAFC : Pile à combustible à acide phosphorique.

DBFC : Pile à combustible à hydrure de bore direct.

DEFC : Pile à combustible à éthanol direct.

FAFC : Pile à combustible à acide formique.

EME : assemblées membrane-électrode.

Convertisseur DC-DC : convertisseur courant continue – continue.

Introduction Générale

L'augmentation de la consommation énergétique accompagnée d'une augmentation de la pollution dans l'atmosphère ainsi que l'épuisement inéluctable des ressources fossiles, attendu l'orientation vers les sources d'énergie renouvelable et écologique (énergie solaire, énergie hydraulique, éolienne, géothermie...). Pour cela, le monde s'orientent actuellement vers des solutions autour des sources hybride renouvelable dans différents secteurs (électronique, téléphones portables, véhicules, avionique, production stationnaire d'électricité, chauffage...).

Notre travail consiste en l'étude la commande et la simulation d'un système hybride composé de trois source, à savoir les pile à combustible, connecter à travers un bus continu avec deux différents dispositifs de stockage, les batteries et les supe condensateurs. Nous contribution dans ce travail réside dans l'application d'un commande pour la gestion de l'énergie d'un système hybride, un système qui peut être aussi utilisé dans les applications véhicule électrique ou d'électrification des charges domestique dans réseaux intelligents, en utilisant une commande non linaire à base de mode glissant.

Ce mémoire est structuré en une introduction générale, trois chapitres et une conclusion générale.

Dans le premier chapitre, nous commençons par des généralités sur les piles à combustible, et leur principale caractéristique.

Le deuxième chapitre est consacré à l'analyse et la présentation des deux éléments de stockage (batterie et super capacité).

Le dernier chapitre contiendra à la commande et la simulation d'une source hybride : pile, batterie et super capacité, une stratégie de commande base sur une commande non linaire a été présenté. Enfin les stratégies de commande sont simulées sur Matlab-Simulink, et une conclusion générale résumant le travail.

Chapitre I :

Généralité sur les piles à combustible

Introduction :

L'objectif principale de ce premier chapitre est de présenter brièvement les piles à combustible, On Commence tout d'abord par un rappel sur les différents types de pile à combustible et leurs principales caractéristiques, ainsi que leur avantages et inconvénients. Puis nous mettrons l'accent sur le principe de la pile à combustible à membrane échangeuse de protons (PEM).

I.1) Description générale d'une pile à combustible :

Une pile à combustible est un générateur d'énergie électrique. Elle transforme directement l'énergie chimique du combustible en énergie électrique. C'est un système qui ne produit pratiquement pas de nuisances sonores, puisqu'il ne comporte pas de composants mécaniques en mouvement, comme les turbines et les moteurs. De plus, le courant électrique est produit tant que la pile est alimentée conjointement en combustible (hydrocarbures, alcools, biomasse, gaz naturel, hydrogène) et en comburant (oxygène de l'air). C'est ce qui la différencie des batteries, accumulateurs et autres piles, où se trouve stockée sous forme chimique une quantité limitée d'énergie électrique et qui doivent soit être rechargés lorsque c'est possible (batterie de véhicule), soit être remplacés (piles pour poste de radio).[2]

I.2) Aperçu historique de la pile à combustible :

L'histoire des piles à combustible a commencé en 1839, lorsque William Robert Grove réalisa l'expérience de l'électrolyse inverse de l'eau, qui a donné naissance à la batterie à gaz (Figure I.1), qui est devenue plus tard une pile à combustible.[1]

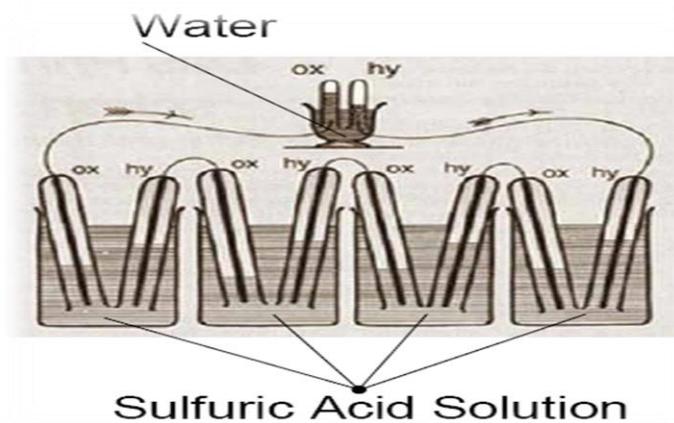


Figure I.1- Expérience de Sir William Grove [10]

Ce fut cependant Christian Friedrich Schönbein qui, en 1838, observe par inadvertance le principe des piles à combustible en travaillant sur l'électrolyse. Dans son expérience, il utilisait un tube en U avec deux électrodes en platine. Grâce à un courant électrique, il parvint à obtenir de l'hydrogène et de l'oxygène. En coupant ce courant, il constata que ces gaz donnaient lieu à un courant électrique de sens inverse. Le principe de l'électrolyse quant à lui, ayant été découvert dès 1806 par Sir Humphry Davy, obtenant de l'hydrogène et de l'oxygène à partir d'eau distillée dans des appareils en argent.[2]

Après quelques améliorations apportées à cette expérience, celle-ci tombe presque dans l'oubli au profit des machines thermiques, des accumulateurs et des piles électriques en vogue à cette période là. Cinquante ans plus tard, en 1889, L. Mond et C. Langer apportent des perfectionnements notamment avec l'introduction de catalyseurs² (platine) ou d'électrolytes pouvant être contenus dans des matrices poreuses en plâtre et en amiante. Ils baptisent cette technologie pile à combustible.

En 1921, E. Baur met en évidence l'importance de la cinétique. Il met au point une cellule fonctionnant à haute température (1000°C), avec une anode de carbone, de l'oxyde de fer comme cathode, et des carbonates alcalins comme électrolytes. Mais c'est en 1956 que F.T. Bacon et J.S. Frost démontrent la faisabilité d'un groupe de puissance de 6 kW qui engendre une certaine effervescence surtout dans le secteur de la recherche spatiale où des réalisations technologiques des piles sont effectuées par la NASA pour l'alimentation électrique des programmes Gemini en 1963 (piles de type PEMFC de General Electric, Apollo en 1968 (piles AFC de Pratt et Whitney) et des navettes spatiales qui sont d'ailleurs toujours employées à ce jour.[4]

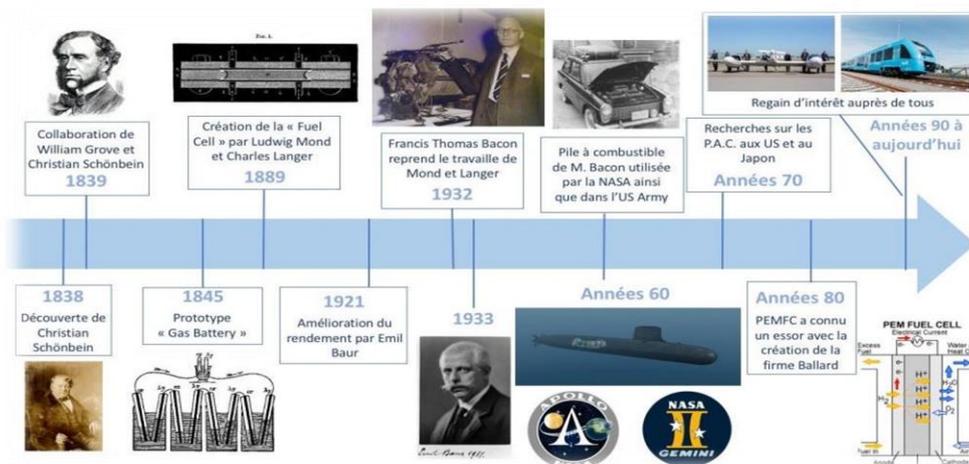


Figure I.2 - Flèche chronologique de l'histoire de la pile à combustible [3]

I.3) Présentation de la pile à combustible :

Pour commencer, il est important de rappeler qu'une PàC est un convertisseur d'énergie, et non un générateur ou une source d'énergie. La PàC convertit l'énergie chimique interne d'un combustible en énergie électrique et thermique. Cette conversion est réalisée grâce à une réaction dite électrochimique d'oxydoréduction

On peut dire que le fonctionnement de toutes les piles à combustible, quelque soit leur technologie (alcaline, carbonate fondu, polymère, céramique, etc.), repose sur le même principe, à savoir qu'elles sont alimentées en Hydrogène et en Oxygène qui, en se combinant dans le cœur de la pile donne lieu à des dégagements de chaleur, d'eau et d'électricité.[2]

I.4) Principe de fonctionnement :

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 I.3). 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 [Tho]. Dans 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 par ailleurs.[4]

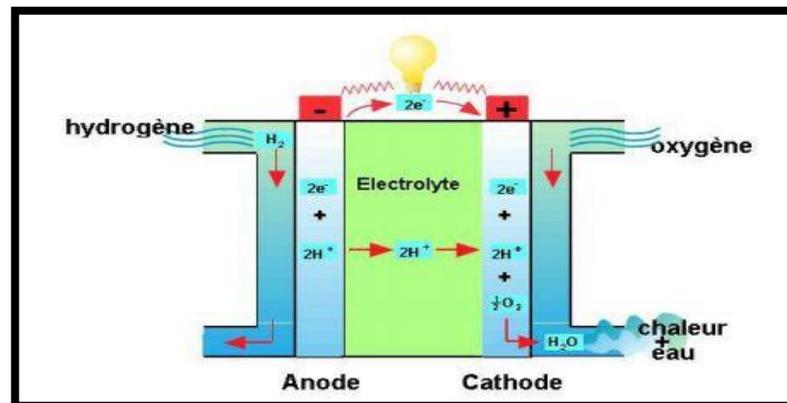


Figure I.3 - Fonctionnement de principe d'une pile à combustible

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.[5]

Les électrolytes peuvent être liquides ou solides, certains fonctionnent à haute température, d'autres à basse température.[6]

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.[8]

I.5) Classification des piles à combustible :

Il existe différents types de piles à combustible qui se différencient essentiellement par la nature de l'électrolyte utilisé et par la température de fonctionnement :

- La Pile A Electrolyte Alcalin (AFC: Alcalin Fuel Cell).
- La Pile à Membrane Electrolyte Polymérique (PEMFC: Polymer Electrolyte Membrane FuelCell ou encore Proton Exchange Membrane Fuel Cell).
- La Pile A Méthanol Direct (DMFC: Direct Methanol Fuel Cell).
- La Pile A Acide Phosphorique (PAFC: Phosphoric Acid Fuel Cell).
- La Pile A Carbonates Fondus (MCFC: Molten-Carbonate Fuel Cell).
- La Pile A Oxyde Solide (SOFC: Solid Oxyd Fuel Cell).

Abreviation	AFC	PEMFC	DMFC	PAFC	MCFC	SOFC
Caractéristique						
Nom en anglais	Alkaline Fuel Cell	Proton Exchange Membrane FC	Direct Methanol Fuel Cell	Phosphoric Acid Fuel Cell	Molten Carbonate Fuel Cell	Solid Oxide Fuel Cell
Electrolyte	Solution KOH (liquide)	Membrane polymère (solide)	Membrane polymère (solide)	Acide phosphorique (liquide)	Li ₂ CO ₃ et KCO ₃ fondu dans une matrice de LiAlO ₂ (liquide)	ZrO ₂ et Y ₂ O ₃ (solide)
Catalyseur	Pt	Pt	Pt	Pt	carbonates de lithium et de potassium	Ni
Ton mobile dans l'électrolyte	OH ⁻	H ⁺	H ⁺	H ⁺	CO ₃ ²⁻	O ²⁻
Température	60-80 °C	60-100 °C	60-100 °C	180-220 °C	600-660 °C	700-1000 °C
	Piles à combustible à faible température			Piles à combustible à forte température		
Combustible	H ₂ pur	H ₂ pur ou reformé	Méthanol	H ₂ pur ou reformé	H ₂ pur ou reformé	H ₂ et CO pur ou reformé
Oxydant	O ₂ pur	Air	Air	Air	Air	Air
Domaines d'application	Spatial, transport (sous-marins)	Electronique portable, transport, cogénération	Electronique portable	Transport, cogénération	Cogénération, production centralisée d'électricité	Cogénération, production centralisée d'électricité, transport (APU)
Rendement électrique	55-60 %	32-40 %	15-25 %	40-45 %	50 % 55 % avec réutilisation de la chaleur	45-50 % 60 % avec réutilisation de la chaleur

Figure I.4- Différents types de piles à combustible

I.5.1) Pile alcaline (AFC) :

Les piles alcalines sont les piles à combustible développées au début des années 60 pour alimenter la navette spatiale Apollo. Elle utilise un électrolyte liquide, en général de l'hydroxyde de potassium (KOH) qui a l'avantage d'accélérer la réduction de l'oxygène. Cependant, elle ne travaille correctement que lorsqu'elle utilise de l'hydrogène et de l'oxygène purs. En effet, lors de l'utilisation d'air ou d'hydrogène réformé, le dioxyde de carbone contenu dans ces derniers réagit avec l'électrolyte KOH et forme du carbonate de potassium, ce qui réduit la mobilité des ions.[4]

Cette pile a l'avantage d'utiliser une grande variété de catalyseurs et présente le meilleur rendement de toutes les piles à combustible. Les catalyseurs sont habituellement une combinaison de nickel et d'un métal inactif comme l'aluminium permettant de réduire le coût global de fabrication de cette technologie. Pour les plaques bipolaires, on utilise le magnésium métallique ou des composés de graphite.

I.5.2) Pile à membrane à électrolyte polymère (PEMFC) :

C'est la technologie la plus prisée pour les applications dans les transports surtout après l'avènement des membranes Nafion au début des années 80. Elle fonctionne à des températures basses (80°C) de façon à maintenir l'eau à l'état liquide dans la membrane. Cette dernière permet le passage des protons H^+ , un catalyseur à base de platine est utilisé aux électrodes, cependant, le monoxyde de carbone peut être absorbé sur ce catalyseur diminuant ainsi l'efficacité de la pile.[6]

Quant aux plaques bipolaires, elles peuvent être conçues de trois manières différentes à savoir en composite, en métal ou en graphite. (Figure I.5).

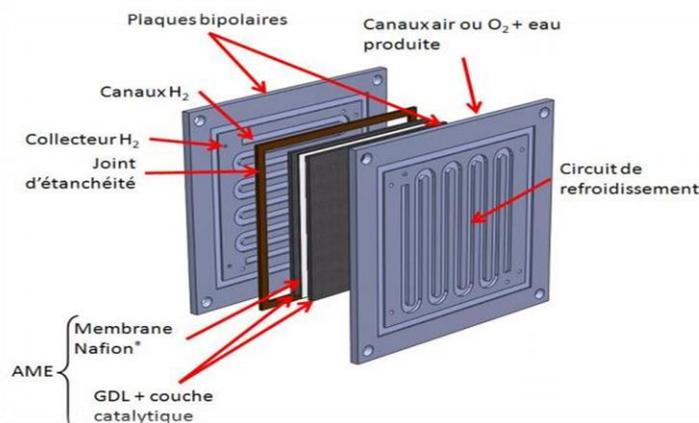


Figure I.5 - Schéma d'une cellule de PEMFC

I.5.3) Pile à méthanol direct (DMFC) :

Le nom de cette pile prête à confusion. En effet, c'est une PEMFC utilisant du méthanol comme carburant qui est directement en contact avec l'anode et non comme on le croirait, une pile qui utilise du méthanol comme source d'hydrogène par un reformage externe. Elle utilise un électrolyte polymérique échangeur d'ions qui se présente sous forme de membrane. Le catalyseur à l'anode est composé d'un mélange de ruthénium et de platine qui empêche l'empoisonnement par le monoxyde de carbone. Les plaques bipolaires sont, quant à elles, faites de graphite, de métal ou de composite.

I.5.4) Pile à acide phosphorique (PAFC) :

C'est une pile généralement réservée aux applications stationnaires, d'où un développement et une commercialisation plus importants comparés aux autres technologies de piles. Il existe déjà des centrales électriques installées dans le monde et qui fournissent des puissances entre 5 et 20 MW.

L'électrolyte est de l'acide phosphorique sous forme liquide. L'acide est généralement stabilisé dans une matrice à base de SiC. La forte concentration en acide augmente la conductivité de l'électrolyte et réduit la corrosion du support des électrodes en carbone. Le catalyseur est à base de platine. Les plaques bipolaires sont deux plaques poreuses séparées par une mince feuille de graphite pour former un substrat dans lequel l'électrolyte est stocké.[8]

I.5.5) Pile à carbonate fondu (MCFC) :

Le développement de ces piles a commencé plus récemment. Elles sont ainsi considérées comme des piles de seconde génération, car apparues bien après les piles fonctionnant à basses températures.

Ces piles fonctionnent à des températures élevées ce qui améliore la cinétique de la réaction de réduction de l'oxygène et rend inutile l'utilisation de métaux nobles comme catalyseurs. Les systèmes à base de piles MCFC peuvent atteindre des rendements électriques supérieurs à 50%. De plus, elles peuvent utiliser une large gamme de carburant, grâce au reformage interne et ne sont pas sensibles à la contamination par CO ou CO₂ comme c'est le cas pour les piles à basses températures.[4]

L'électrolyte est constitué d'un mélange de carbonates de métaux alcalins (carbonates de lithium, de potassium et de sodium) retenu par une matrice céramique d'oxyde d'aluminium et de lithium (LiAlO₂). Les plaques bipolaires sont faites d'acier inoxydable recouvert de nickel.

Le choix des matériaux est important, en raison de la température de fonctionnement élevée et de la nature hautement corrosive de l'électrolyte.

I.5.6) Pile à oxyde solide (SOFC) :

La caractéristique principale de cette pile est qu'elle fonctionne à hautes températures.

Pour cela, c'est une pile généralement exploitée en cogénération et destinée à la production d'électricité décentralisée pour des gammes de puissances allant de 1 kW à quelques dizaines de MW. L'utilisation directe d'hydrocarbures facilement reformés, en se passant de catalyseur à base de métaux nobles, est la conséquence du fonctionnement à hautes températures.

L'électrolyte est solide, habituellement du Zircone (Zr_2) dopé avec de l'ytterbium (Y^{3+}), lequel joue le rôle de conducteur pour l'anion oxygène (O^{2-}).

Contrairement aux autres technologies, la pile à oxyde solide peut être de forme tubulaires ou planaires.[6]

I.6) Domaines d'application :

Les piles à combustibles sont utilisées dans une large gamme de domaines qui seront présentés ci-dessous. Les applications sont :

I.6.1) Applications dans les transports :

Parmi les applications des piles à combustible dans le domaine de l'automobile, on peut citer la PEMFC pour la propulsion du véhicule (20 à 50 kW) et les piles alcalines pour l'alimentation en électricité des appareils de bord (climatisation, appareils électroniques).[1]

I.6.2) Applications stationnaire :

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).[3]

I.6.3) Applications spatial :

La NASA a utilisé des piles à combustible de type AFC pour alimenter en électricité les circuits de navettes spatiales notamment au cours du programme GEMINI et des missions APPOLO. Il est maintenant question de choisir les PEMFC dans des applications futures. L'armée allemande a aussi développé un sous marin fonctionnant grâce à des PAC.[2]

I.6.4) 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.[6]



Figure I.6- Les Application de piles à combustibles

I.7) Avantages et inconvénients des piles à combustible :

Les avantages et inconvénient des piles à combustible dépendent bien entendu du type de pile considéré et donc de l'application envisagée. [1]

I.7.1) Avantages des piles à combustible :

Les piles à combustibles sont souvent présentées comme la solution du futur dans les domaines de production d'énergie électrique, de l'automobile. Cet attrait est justifié par leurs nombreux avantages [2] :

- De hauts rendements énergétiques même à charge partielle
- Peu d'émissions (elles dépendent cependant du combustible utilisé)
- Elles sont de construction modulaire,
- Diverses températures de fonctionnement (PEMFC)
- Pas de parties rotatives

I.7.2) Inconvénients des piles à combustible :

Si les piles sont si intéressantes, pourquoi ne les trouve-t-on pas sur le marché ? En fait, il reste de nombreux points faibles qui sont à régler [3] :

- Le coût.
- Le poids et le volume.
- La durée de vie.
- La gestion thermique du module.
- Le carburant et la mise en place des normes de sécurité liées à son emploi.

I.8) 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.[5]

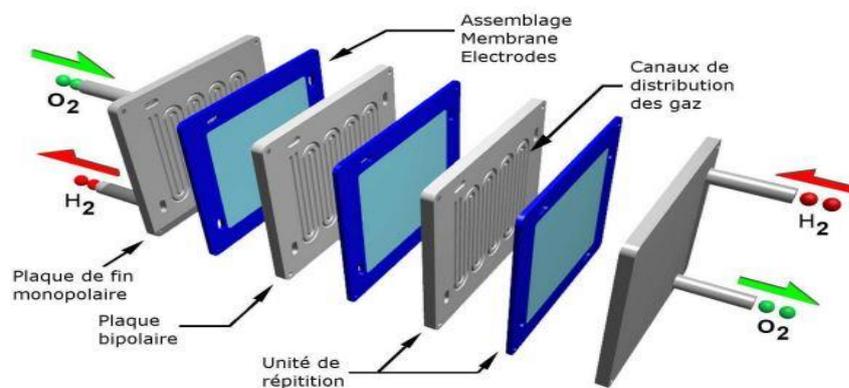


Figure I.7 - Pile à combustible de type PEM alimentée en hydrogène et en oxygène

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.

I.8.1) Assemblage membrane-électrodes :

L'assemblage membrane-électrodes est le cœur de la pile à combustible. Il se compose d'une membrane d'électrolyte de polymère solide serrée entre deux électrodes de carbone poreuses. Un catalyseur à base de platine est intégré entre la membrane et les électrodes. Les électrodes incluent souvent des joints améliorant le contact avec les composants adjacents et évitant les fuites. A titre d'exemple, la figure 1.5 présente l'assemblage membrane-électrodes de sept couches de la compagnie 3M.[7]

I.8.1.1) Electrodes :

Les électrodes fournissent l'interface entre les gaz réactifs et l'électrolyte. Elles doivent permettre le passage du gaz humide, fournir une surface de réaction où les gaz entrent en contact avec l'électrolyte, être conductrices aux électrons libres et assurer le passage des ions vers la membrane. Du papier en fibre de carbone est typiquement utilisé pour cet objectif parce qu'il est poreux, hydrophobe (non-mouillable), conducteur et non-corrosif. Le matériau d'électrode est très mince pour faciliter le transport des gaz et de l'eau.

I.8.1.2) Electrolyte :

L'électrolyte en polymère solide est la caractéristique distinctive d'une pile à combustible de type PEM. L'électrolyte est une membrane mince d'une épaisseur de 50 à 175 μm . Tous les électrolytes acides en polymère solide exigent la présence de molécules d'eau pour conduire les ions d'hydrogène, les ions d'hydrogène se déplaçant ainsi que des molécules d'eau pendant la réaction d'échange ionique. La proportion d'eau par rapport aux ions d'hydrogène pour obtenir une conductivité efficace est typiquement dans un rapport de 3 pour 1. Pour cette raison, les gaz en contact avec une membrane doivent être saturés en eau pour assurer un fonctionnement efficace.

I.8.1.3) Plaque bipolaire :

Les plaques bipolaires dirigent le carburant et l'oxydant des deux côtés opposés des assemblages membrane-électrodes. Chaque plaque contient des canaux de conception sinueuse qui maximise la répartition des gaz (figure 1.7). La forme des canaux de gaz est un paramètre important pour la production uniforme d'électricité, un fonctionnement stable des cellules et la gestion de l'eau. Des conceptions différentes des plaques bipolaires sont adaptées aux diverses applications de pile à combustible.

I.8.2) Humidificateur :

L'humidification des gaz réactifs est un aspect important du fonctionnement des piles PEM. Sans une bonne humidification de la membrane, la conduction des ions ne peut pas se produire et des dommages de la pile à combustible peuvent résulter. La quantité d'eau qu'un gaz peut absorber dépend fortement de la température d'humidification, en particulier à basse pression. Sur certains stacks, des humidificateurs sont intégrés au stack lui-même. Sur d'autres, les humidificateurs sont des composants externes.[8]

I.9) 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.[1]

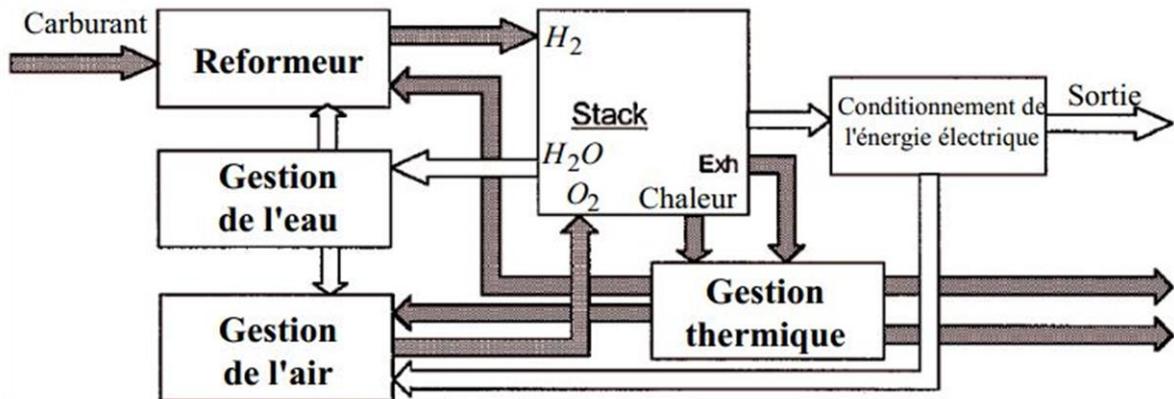


Figure I.8 - Différents constituants d'un système pile à combustible

Conclusion :

Ce chapitre s'est intéressé aux présentations et définition des piles à combustible et principalement aux piles PEM. Les différents points abordés ont concerné quelques rappels historiques du développement des piles à combustible, leur principe de fonctionnement, l'architecture des systèmes, les principaux fabricants actuels en Europe et en Amérique du Nord. Enfin, la caractéristique statique d'une pile PEM a été rappelée.

Généralité sur les super condensateurs et les batteries

Introduction :

Nous présentons dans ce chapitre les caractéristiques des différents éléments de stockage qui peut être associées aux condensateurs ainsi que leur principe de fonctionnement. Nous étudierons aussi leurs caractéristiques physiques et électrique, leurs limitations et modèles, ainsi que leurs avantages et inconvénients. Enfin, les différents composants constituant ces sources, feront partie de notre intérêt.

II.1) Principe des super condensateurs:

Les super condensateurs à couche double électrique, curieusement appelées capacités électrochimiques, ont en fait un fonctionnement analogue à celui des capacités électrostatiques classiques.[1] Lesdites sont typiquement constituées de deux électrodes métalliques séparées par un matériau diélectrique. L'énergie est stockée sous forme d'une charge électrique induite au voisinage de l'interface électrode-diélectrique, par l'application d'une différence de potentiel entre ces deux électrodes. Le rapport de la charge stockée sur la tension appliquée est connu sous le nom de capacitance, ou capacité, et est représentatif de l'aptitude du dispositif à stocker de l'énergie. Le stockage d'énergie dans les super condensateurs s'effectue de façon similaire, mais à l'interface entre l'électrode (conducteur électronique) et l'électrolyte (conducteur ionique), comme indiqué (Figure II.1).[7][9]

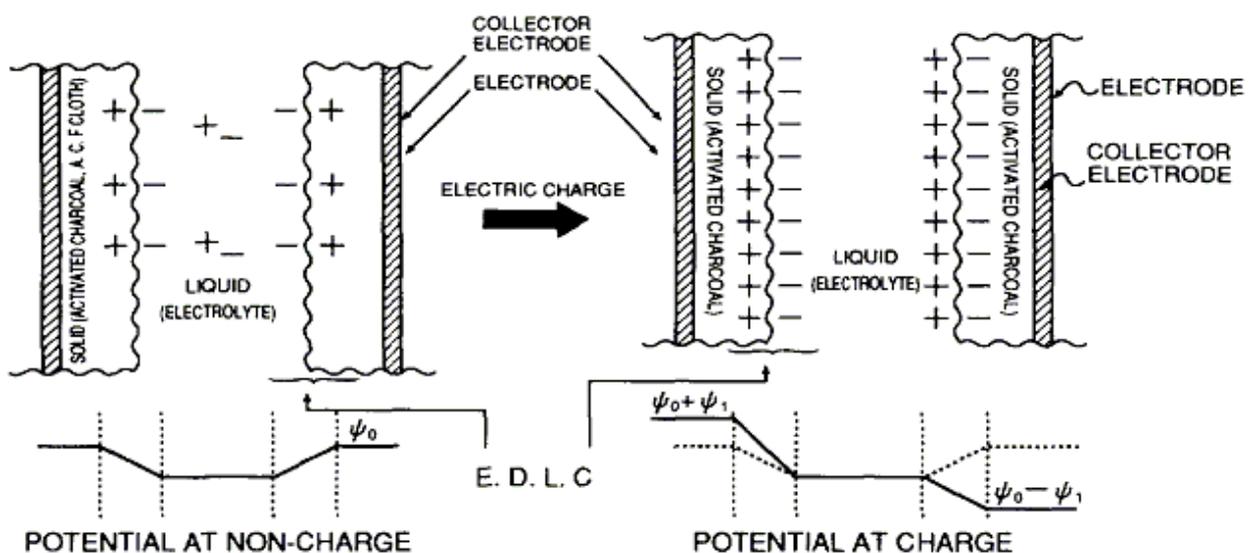


Figure II.1 - Schéma de principe des super condensateurs [5]

II.2) Les différents éléments du super condensateur :

Un super condensateur est composé de deux électrodes, et d'un électrolyte et d'un isolant (séparateur) comme montre les figures suivante :



Figure II.2 - différents éléments du super condensateur [16]

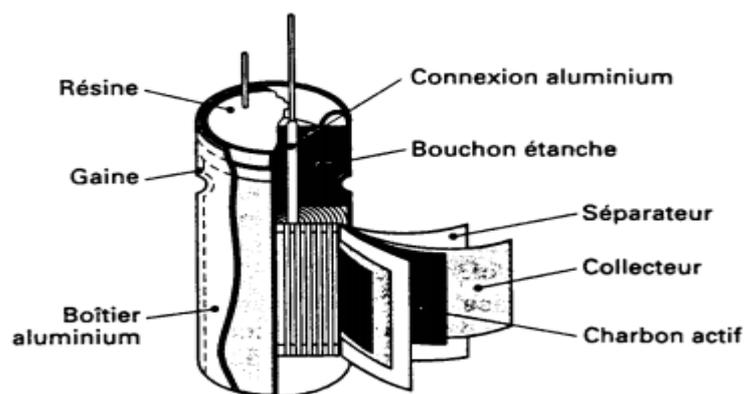


Figure II.3 - Modèle super condensateur [8]

II.2.1) Electrodes :

Selon le type de matériaux Il existe différents types d'électrodes polarisables. En particulier [5]:

- les charbons actifs
- les fibres de tissu activé

II.2.1.1) Les charbons actifs :

Le charbon actif est un composé carboné, ayant des surfaces spécifiques comprises entre 100m²/g et 2500m²/g. l'augmentation du surface possède deux avantages

- la résistance est plus faible

- les caractéristiques électrochimiques meilleures lorsque la taille des pores sont adaptée à la taille de l'ion actif dans la double couche dont le type des pores est cylindrique.
- un taux d'impuretés métalliques trop important ($>100\text{ppm}$) entraîne une autodécharge importante.

II.2.1.2) Les tissus actifs :

Ce sont des produits basés sur l'utilisation de fibres polymères. Les surfaces spécifiques actives atteignent là encore $2000\text{ m}^2/\text{g}$. Par rapport aux charbons actifs, ces produits présentent des porosités bien supérieures, une meilleure conductivité électronique avec moins d'impuretés. Le seul désavantage de ce type d'électrode est le coût très supérieur par rapport à la technologie basée sur les charbons actifs.[7]

II.2.2) L'électrolyte :

Selon la conductivité et le potentiel maximal supporté par l'électrolyte se base le choix de l'électrolyte. Il existe deux types d'électrolyte [13]:

II.2.2.1) L'électrolyte aqueux :

Comme H_2SO_4 ou KOH qui possèdent un domaine de potentiel limité, mais une conductivité élevée.

II.2.2.2) L'électrolyte organique :

Tel que le Carbonate de Propylène avec un domaine de potentiel plus élevé mais une conductivité plus faible. L'électrolyte peut être liquide ou polymère (plastique ou gel). Afin d'obtenir des densités de puissances importantes, la technologie film mince-électrolyte liquide semble la mieux adaptée.

II.2.3) Le séparateur :

Est une membrane isolante poreuse aux propriétés spécifiques. Il doit faciliter le passage des ions de l'électrolyte et assurer une isolation électronique entre les deux électrodes imprégnées d'électrolyte. Il est souvent à base de polyéthylène et de polypropylène.[8]

II.2.4) Collecteur de courant :

Ils doivent être d'épaisseurs minimales afin de limiter le plus possible leur contribution à la densité d'énergie et la densité de puissance.[9]

II.3) Applications courantes des super condensateurs :

Les super condensateurs 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, Deux exemples d'applications couramment envisagées sont :

- De permettre le démarrage fréquent des moteurs thermiques par des super condensateurs, en remplacement des batteries (systèmes Stop & Start...).[1]
- La traction électrique autonome entre deux stations du transport urbain, basée sur le principe du biberonnage en station pendant l'arrêt.[9]

II.4) Super condensateurs : avantages et inconvénients :

II.4.1) Les avantages :

Cycle de vie charge / décharge important comparé aux batteries chimiques sans dégradation des caractéristiques [1][11]:

- 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.4.2) Les inconvénients :

Basse énergie spécifique (10 Wh/kg).[14]

- 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.

II.5) Les différentes familles des Super condensateurs

Deux grandes familles de Super condensateur sont en concurrence : elles se différencient par leurs matériaux d'électrodes et leurs électrolytes.[5][8][9]

Electrode	Charbon actif		Matériau métallique	Polymère conducteur
Electrolyte	Acide sulfurique	Electrolyte organique		Electrolyte organique
Moyen de stockage	énergie stockée dans la double couche		double couche + processus faradiques réversibles	double couche + processus faradiques réversibles
Energie massique (Wh.kg ⁻¹)	0.2 à 1.1	2 à 4.2	2.7 à 5.5	11
Puissance massique (kW.kg ⁻¹)	1 à 10	0. à 1	10 à 100	100
Capacité massique (F.g ⁻¹)	120 à 180	60 à 100		200 à 400
Tension (V)	0.8 à 1.2	2 à 3	0.8 à 1.2	2.5

Figure II.4 - Les différentes familles des super condensateurs

II.6) les batteries :

II.6.1) Présentation des batteries :

Les batteries Nommées aussi les "accumulateurs électriques sont des systèmes électrochimiques servant à stocker de l'énergie. Celles-ci restituent sous forme d'énergie électrique, exprimée en Watt-heure [Wh], l'énergie chimique générée par des réactions électrochimiques une forte densité énergétique mais une faible densité de puissance. Leur durée de vie en nombre de cycles charge-décharge est relativement limitée.[10]

II.6.2) Types des batteries :

Il existe toute une gamme de batteries, afin de les différencier, on peut les partager selon la quantité d'énergie qu'elles peuvent stocker. Citons les plus utilisées, batteries [12]:

- Au plomb.
- Ni-Cd.
- Ni-MH.
- Lithium-ion.

II.6.3) Grandeurs caractéristiques d'une batterie :

Les principales grandeurs caractéristiques d'une batterie sont les suivantes [14]:

- la capacité
- le potentiel de fonctionnement
- l'énergie stockée et densité d'énergie
- la densité de courant et le courant maximal applicable
- la cyclabilité
- la durée de vie
- l'autodécharge
- la tenue en température.

II.6.4) Liaisons des batteries :

Pour avoir une tension désirée, on peut généralement connecter les cellules de la batterie en série de sorte que leur tension augmente jusqu'à la valeur requise. Par exemple, une batterie de 6V peut être réalisée en connectant en série trois cellules lead-acide (au plomb) de 2.0V ou cinq cellules nickel-cadmium de 1.2V. [14]

II.6.4.1) Connexion en série :

Si les batteries sont connectées « plus » à « moins » (positive d'une cellule à négatif de la cellule suivante), de sorte que leur tension atteigne une valeur appropriée pour l'application demandée, elles sont dites «connectées en série». On note que le même courant va traverser toutes les cellules

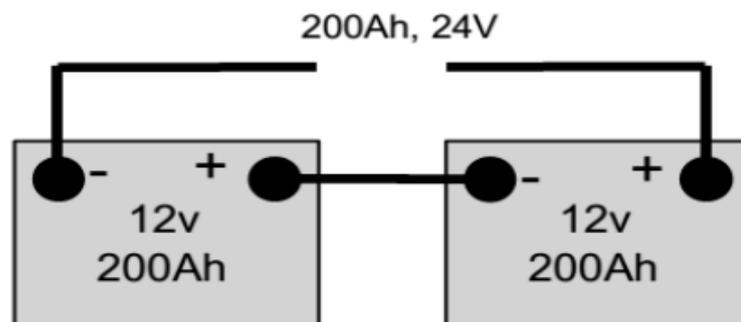


Figure II.5 - Liaison en série des batteries

II.6.4.2) Connexion parallèle :

Si deux ou plusieurs batteries sont connecté « plus » à « plus » et « moins » à « moins » (positif d'une cellule à la borne positive de l'autre et de même pour les pôles négatifs) alors elles ont dit connectées en parallèle. Deux piles reliées en parallèle produiraient la même tension que d'une seule cellule, mais ils sont capables de délivrer deux fois le courant. Elles auraient aussi deux fois la capacité de stockage d'une seule cellule à la même tension.

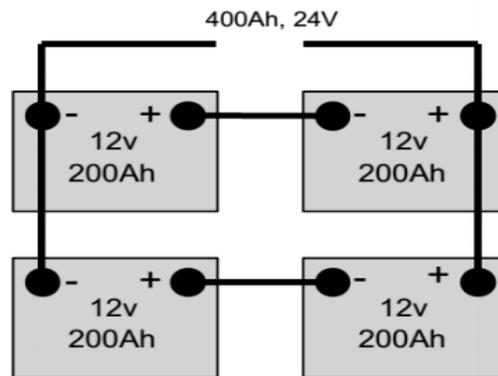


Figure II.6- Liaison en série et en parallèle des batteries [14]

II.7) Comparaison entre les batteries et les super condensateurs :

Le super condensateur possède une puissance instantanée plus importante que celle des batteries et une énergie plus grande que celle des condensateurs classiques. Sa durée de vie est plus élevée que celle des batteries (environ 10 ans). Sur le diagramme de Ragone (Fig. II.6), nous avons représenté les différents systèmes de stockage d'énergie électrique dans le plan puissance spécifique-énergie spécifique. Ce diagramme montre que les condensateurs électrochimiques possèdent une très grande densité de puissance mais une très faible énergie spécifique. Ils sont utilisés généralement pour des constantes de temps inférieures à quelques centaines de ms. Les batteries ont une densité de puissance très faible et une énergie spécifique élevée. Elles peuvent être utilisées avec une constante de temps supérieure à la mn. En ce qui concerne la pile à combustible c'est un convertisseur d'énergie et non pas un élément de stockage. Entre les batteries et les condensateurs électrochimiques se trouvent les super condensateurs qui sont utilisés pour stocker l'énergie avec une constante de temps inférieure à quelques dizaines de secondes.[8][11]

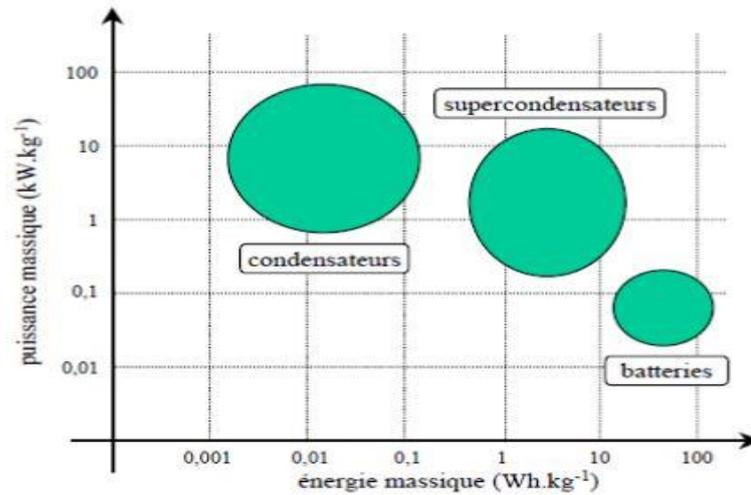


Figure II.7- Diagramme de RAGONE [9]

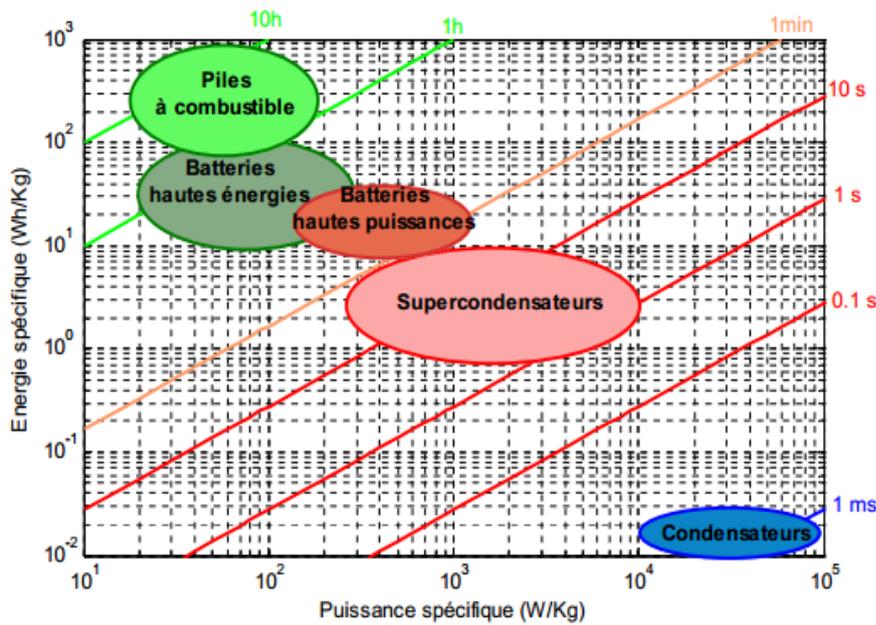


Figure II.8 - Positionnement de différentes sources électriques dans le diagramme de Ragone [16]

Conclusion :

Dans ce chapitre, on a présenté brièvement les deux principales sources de stockage utilisant dans les systèmes hybride afin de pouvoir évaluer son performance et son comportement. L'exploitation d'une source hybride nécessite la bonne maîtrise de ses sources, c'est pour cela, ce chapitre a été consacré à une présentation théorique et une analyses de leurs caractéristique, différents types, ainsi que leurs avantages et inconvénients.

Chapitre III :

Commande de la source hybride

(Pile a combustible / super condensateur /Batterie)

Introduction :

On s'intéresse dans ce chapitre à la commande et simulation d'un système hybride pile à combustible, batterie et super condensateur. Nous allons présenter la une commande basé sur des régulateur linaire PI et des régulateurs non linaire glissant.

III.1) Structure des sources :

Le système, illustré à la (Fig.III.1), comprend un bus DC directement alimentée par des batteries, une PEMFC connectée au bus DC utilisant un convertisseur élévateur et un dispositif de stockage super capacitif connecté à la liaison DC via un convertisseur DC-DC à courant réversible. Le rôle du FC et des batteries est de fournir une puissance moyenne à la charge, alors que le dispositif de stockage est utilisé comme source d'alimentation : il gère les pics de puissance de la charge lors des accélérations et des freinages.[1]

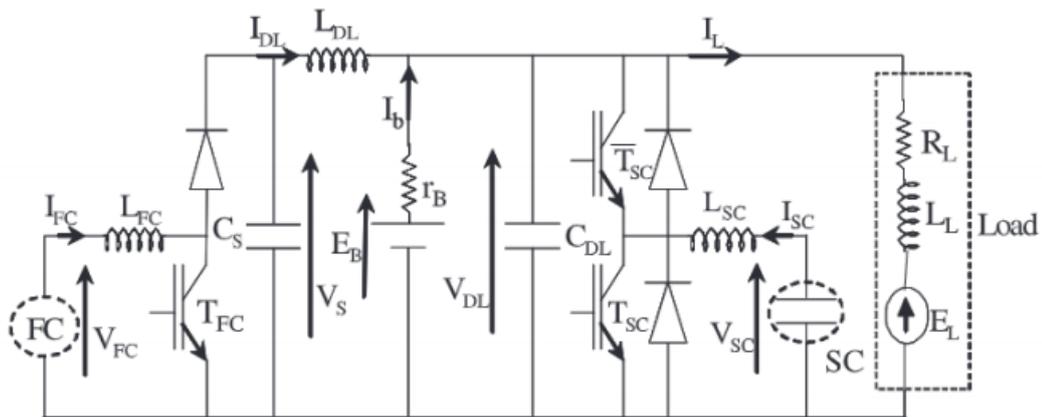


Figure III.1 Structure de la source hybride

Le système proposé fournit l'énergie au bus DC où une machine DC est connectée. Cette machine joue le rôle de la charge agissant en tant que moteur ou en tant que générateur lors de la coupure.

L'objectif principal de l'étude est de présenter une technique de contrôle pour la source hybride.

Une stratégie de commande, basées sur la commande par mode glissant, a été envisagée, Le second objectif est de maintenir une énergie moyenne délivrée par les FC, sans pic de puissance significatif, et la puissance transitoire est fournie par les SC. Un troisième but consiste à récupérer l'énergie projetée par la charge du SC.[15]

III.2) Modélisation des piles à combustible, des super condensateurs et des batteries :

III.2.1) Modèle de pile à combustible :

La tension de sortie du FC " V_{fc} " peut être définie par un modèle statique et non linéaire comme indiqué dans [2] :

$$V_{FC} = E_0 - A \log \left(\frac{i_{FC} - i_n}{i_0} \right) - \left\{ R_m (i_{FC} - i_n) + B \log \left(1 - \frac{i_{FC} - i_n}{i_{Lim}} \right) \right\} \dots (1)$$

E_0 est la tension réversible sans perte de la pile à combustible, i_{FC} est le courant délivré, i_0 est le courant d'échange, A est la pente de la ligne de Tafel, i_{Lim} est le courant limite, B est la constante de transfert de masse, i_n est le courant interne et R_m sont les résistances de membrane et de contact.

III.2.2) Modèle des super condensateurs :

Le modèle électrique du SC est donné sur la (Fig.III.2). La capacité différentielle est représentée par deux condensateurs : un condensateur constant C_0 et un condensateur dépendant de la tension linéaire kV_0 .

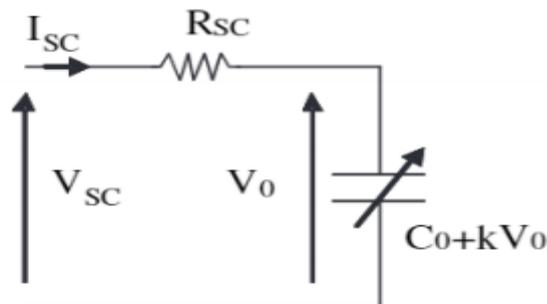


Figure III.2 - Model électrique super capacité

k est une constante correspondant à la tension de pente [12] .

Le SC est alors modélisé par :

$$\begin{cases} \frac{dV_0}{dt} = \frac{1}{C_0 + kV_0} I_{SC} \\ V_{SC} = R_{SC} I_{SC} + V_0 \end{cases}$$

Où $C_0 + kV_0 > 0$

III.2.3) Modèle de batterie :

De nombreux circuits électriques équivalents de batterie peuvent être trouvés dans la littérature. .

Le circuit de Thevenin (illustré à la Fig.III.3) est l'un des circuits les plus élémentaires utilisés pour étudier le comportement transitoire de la batterie.

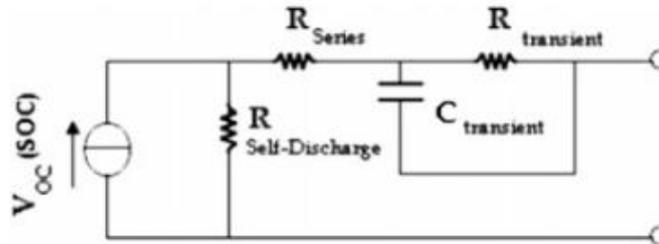


Figure III.3 - Model Thevenin

Il utilise une résistance en série (R -série) et un réseau parallèle RC (R -transient et C -transient) pour prédire la réponse de la batterie aux événements de charge transitoires à un état de charge particulier en supposant qu'une tension de circuit ouvert constante [$V_{OC}(SOC^{-1})$] est maintenue (Fig.III.4).

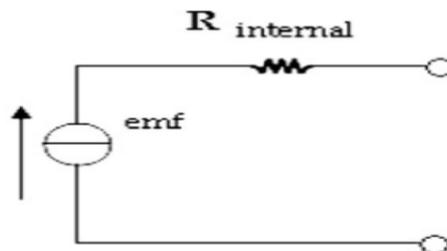


Figure III.4 - Circuit de batterie emf et résistance interne

III.3) Contrôle en mode glissant des sources hybrides :

En raison de la faible demande sur le FC, un régulateur à base de deux boucles PI classique avec mode glissant a été adapté pour le convertisseur boost. Cependant, en raison de la réponse rapide de la puissance transitoire et de la possibilité de travailler avec une fréquence constante ou variable, une commande en mode glissant a été choisie pour le convertisseur DC-DC SC bidirectionnel.[16]

III.3.1) Principe de commande du convertisseur DC-DC boost FC :

Pour la commande du convertisseur DC-DC boost, on présentera une commande basée sur une double boucle de régulation composée par une boucle de tension, avec un régulateur linéaire PI, et une boucle de courant basée sur un régulateur par mode glissant, de type non linéaire.[14]

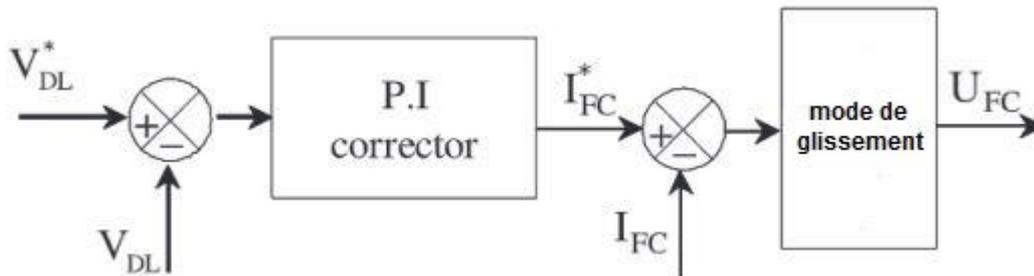


Figure III.5 - Présentes le contrôle synoptique du premier boost FC hybride.

Les équations suivantes définissent respectivement le modèle moyen de convertisseur boost

$$\begin{cases} L_{FC} \cdot \frac{dI_{FC}}{dt} = V_{fc} - (1 - D_1) \cdot V_{DL} - r_{L_{FC}} \cdot I_{FC} \\ C \cdot \frac{dV_{DL}}{dt} = -I_{DL} + (1 - D_1) \cdot I_{FC} \end{cases} \quad (1)$$

La surface de glissement est donnée par

$$S_{IL_1} = (I_{FC_1} - I_{FC_{ref}}) + k_{Ifc} \int_0^t (I_{FC_1} - I_{FC_{ref}}) dt \dots (2)$$

Avec k_{Ifc} est le gain intégral.

La dynamique de convergence des surfaces de glissement à zéro est définie comme suit :

$$\dot{S}_{ifc} = -\lambda_{ifc} S_{ifc} \quad (3)$$

A l'aide des relations (1), (2) et (3) on peut exprimer les rapports cycliques (D_1) comme suit:

$$D_1 = 1 - \frac{V_{fc} - r_{li} \cdot I_{FC} + L_{FC} (\lambda_{iFC} S_{iFC} - \dot{I}_{FC,ref} + K_{FC} \cdot (I_{FC} - I_{FC,ref}))}{V_{DL}} \quad (4)$$

III.3.2) Principe de commande du convertisseur DC-DC des super condensateurs :

Afin d'assurer le bon fonctionnement des trois modes, nous avons utilisé une stratégie de commande par mode glissant du convertisseur DC-DC. Ici, on définit.[15]

Une surface de glissement S_2 en fonction du courant de bus continue I_{DL} . Le courant de charge I_L , la tension SC V_{sc} . sa référence V_{sc} . Et le courant SC I_{sc} :

$$S_2 = k_{12} (I_{DL} - I_L) + k_{22} (I_{sc} - I_2) \dots\dots (5)$$

Avec :

$$I_2 = k_{ps2} (V_{SC} - V_{SC}^*) + k_{is2} \int_0^t (V_{SC} - V_{SC}^*) dt \dots\dots (6)$$

Avec, k_{ps2} et k_{is2} sont les gains proportionnels et intégraux.

Dans le cas d'une commande à fréquence constante, le l'équation du système général peut s'écrire :

$$\dot{X}_2 = A_2 X_2 + B_2 U_2 + C_2 + \varepsilon_2 \quad (7)$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} -1/(r_B \cdot C_{DL}) & 1/C_{DL} & 0 & 0 \\ -1/L_{SC} & -r_{SC}/L_{SC} & 1/L_{SC} & 0 \\ 0 & -1/C_{SC} & 0 & 0 \\ 0 & -k_{ps2}/C_{SC} & k_{is2} & 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$B_2 = \begin{bmatrix} -I_{SC} & V_{DL} & 0 & 0 \end{bmatrix}^T \quad (9)$$

$$\varepsilon_2 = \begin{bmatrix} \frac{I_{DL} - I_L}{C_{DL}} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T \quad (10)$$

$$C_2 = \begin{bmatrix} \frac{E_B}{(r_B C_{DL})} & 0 & 0 & -k_{is} V_{SC} \end{bmatrix}^T \quad (11)$$

$$U_2 = U_{SC}$$

$$\text{Si : } G = [k_{12} \quad k_{22} \quad 0 \quad -k_{22}] \quad (12)$$

La surface de glissement est donnée par :

$$S = C_{DL} \varepsilon_2 + G_2 X_2 \quad (13)$$

$$\dot{S}_2 = -\lambda_2 S_2 - k_2 \text{sign}(S_2) \quad (14)$$

$$k_2 = 0 \quad \text{si } \|S_2\| < \varepsilon_2$$

$$\text{et } k_2 = n_2 \lambda_2 \varepsilon_2 \quad \text{si } \|S_2\| > \varepsilon_2$$

Le terme linéaire $-\lambda_2 S_2(X)$ impose à la dynamique de rester à l'intérieur de la largeur de bande d'erreur ε_2 . Le choix d'une valeur élevée de $\lambda_2 (\leq f_c / 2)$ assure une petite erreur statique lorsque $\|S_i\| < \varepsilon_i$. Le terme non linéaire $-K_1 \text{sign}(S_2)$ permet de rejeter les effets de perturbation (incertitude du modèle, variations des conditions de travail). Ce terme permet de compenser des valeurs élevées d'erreur $\|S_2\| > \varepsilon_2$ en raison des perturbations mentionnées ci-dessus. Le choix d'une petite valeur de λ ; conduit à de fortes ondulations de courant (effet de broutage) mais l'erreur statique reste faible. Une valeur élevée de λ oblige à réduire la valeur de λ ; pour assurer la stabilité du système et conduit à une erreur statique plus élevée. Une fois les paramètres $(k_2, \lambda_2, \varepsilon_2)$ de la loi d'atteinte déterminés, il est possible de calculer la commande équivalente continue, qui permet de maintenir l'état trajectoire sur la surface de glissement.

Les équations(7),(12) et (13) sont utilisées, on trouve pour le système :

$$U_{sc2} = (G_2 B_2)^{-1} \left\{ -G_2 A_2 X_2 - G_2 C_2 - \lambda_2 G_2 X_2 - K_2 \text{sign}(S_2) - C_{DL} [\xi_2 + \lambda_2 \xi_2] \right\} (15)$$

La loi de commande (15) contient la commande équivalente. Cette équation donne l'équation :

$$A_{eqi} = A_2 - B_2 (G_2 B_2)^{-1} G_2 A_2 - B_2 (G_2 B_2)^{-1} \lambda_2 G_2 (16)$$

L'équation (16) permet de trouver les pôles des systèmes au cours du mouvement de glissement en fonction de λ_2, k_2, k_2 .

Les paramètres k_{isi} et k_{psi} sont alors déterminés en résolvant $S_i = 0$, équation justifiée par le fait que la dynamique de la surface de glissement est énormément supérieure à la variation de tension SC.

III.3.3) Stabilité :

Considérons la fonction de Lyapunov suivante :

$$V_2 = \frac{1}{2} S_2^2 (17)$$

Avec S est la surface de glissement

La dérivée de la fonction de Lyapunov le long de la trajectoire de (17) est :

$$\dot{V}_2 = S_2 \dot{S}_2 = -\lambda_2 S_2^2 - k_2 S_2 \text{sign}(S_2) \leq 0 (18)$$

Avec $\lambda_2, k_2 > 0$

Donc, l'origine, avec le glissement surface donnée par (5).

Est globalement asymptotiquement stable puisque la fonction de Lyapunov (17)

Est radialement illimitée et sa dérivée strictement négative

Lorsque $S_2 \neq 0$ et $V_2 = 0$ $S_2 = 0$.

III.4) Résultats de la simulation du contrôle des sources hybrides :

L'ensemble du système a été implémenté dans le logiciel Matlab - Simu Link avec les paramètres suivants associés aux sources hybrides :

Capacité de sortie Boost	C=8800uF
Capacité de Bus Continu	C=3000uF
Tension de référence de bus	24v
Inductance Boost/Buck	10uH
Tension Batterie	24v
Puissance Pile	500W

Les résultats présentés dans cette section ont été réalisés en connectant la source hybride à une charge « R_1 , L_1 et E » représentant une machine à courant continu monophasé.

III.5) Résultats de la simulation :

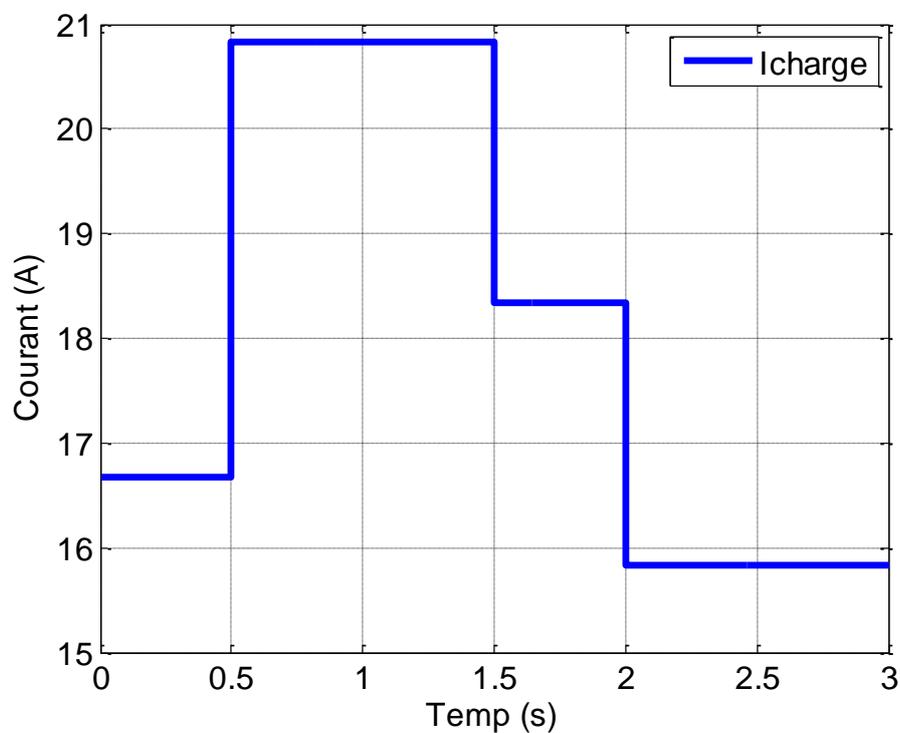


Figure III.6 - Courant de charge I_{DL}

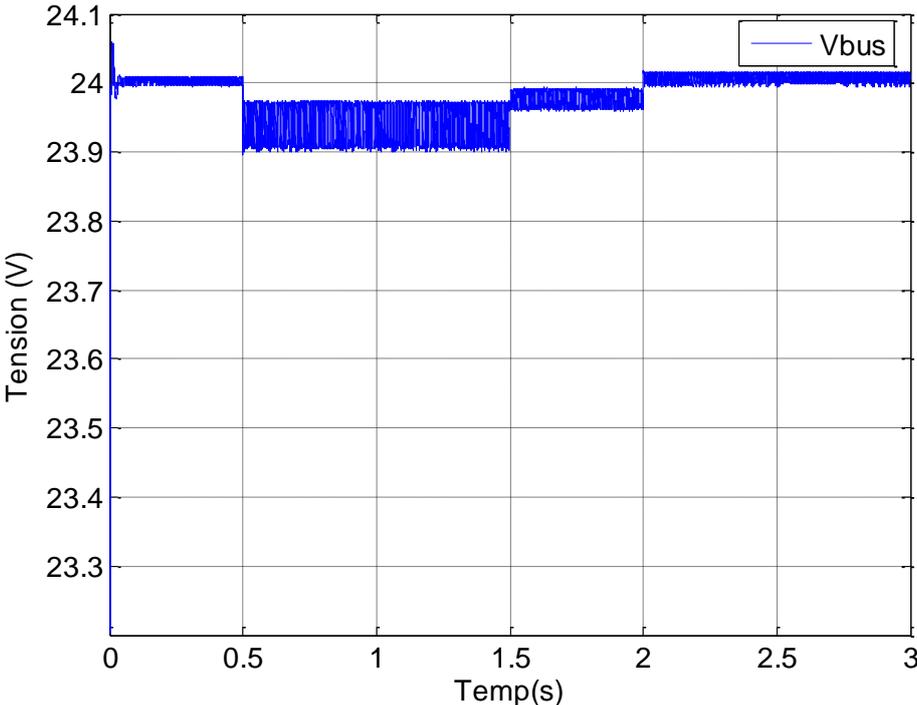


Figure III.7- Tension de Bus continu V_{DL}

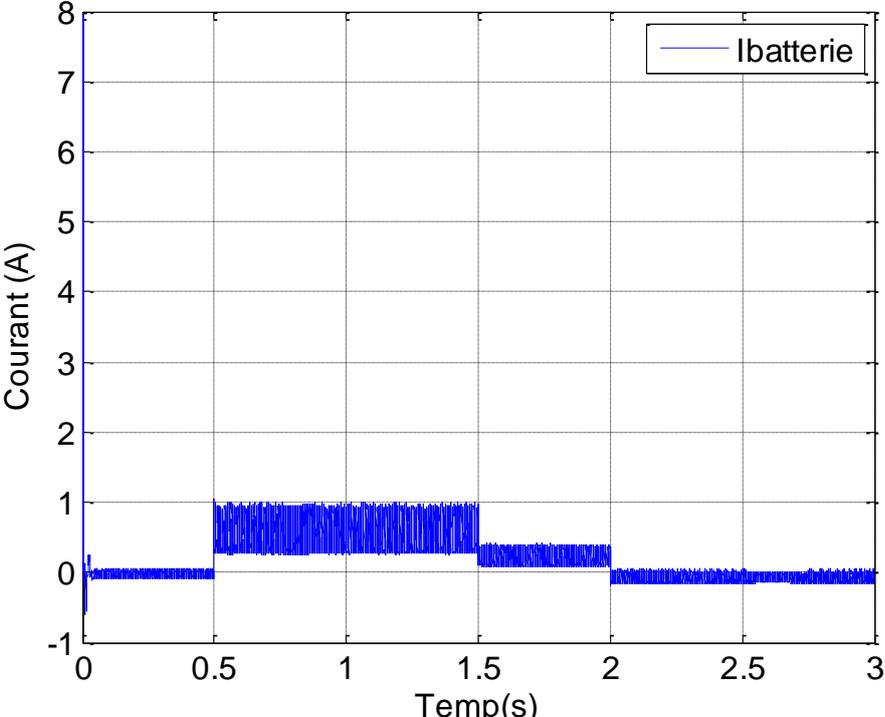


Figure III.8 - Courant de batterie

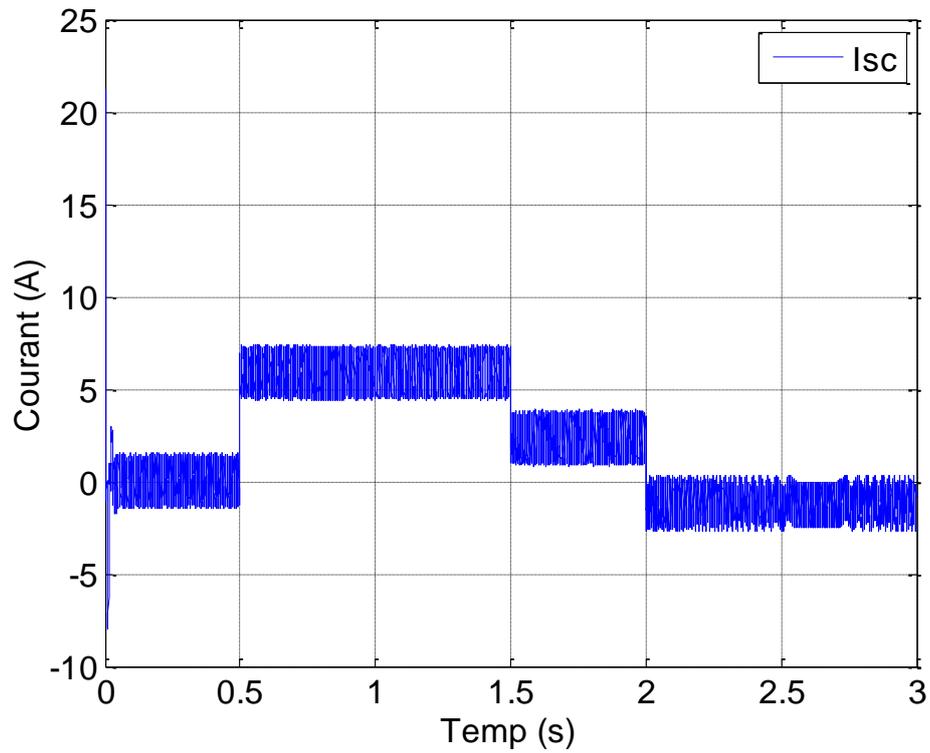


Figure III.9 - Courant de super capacité

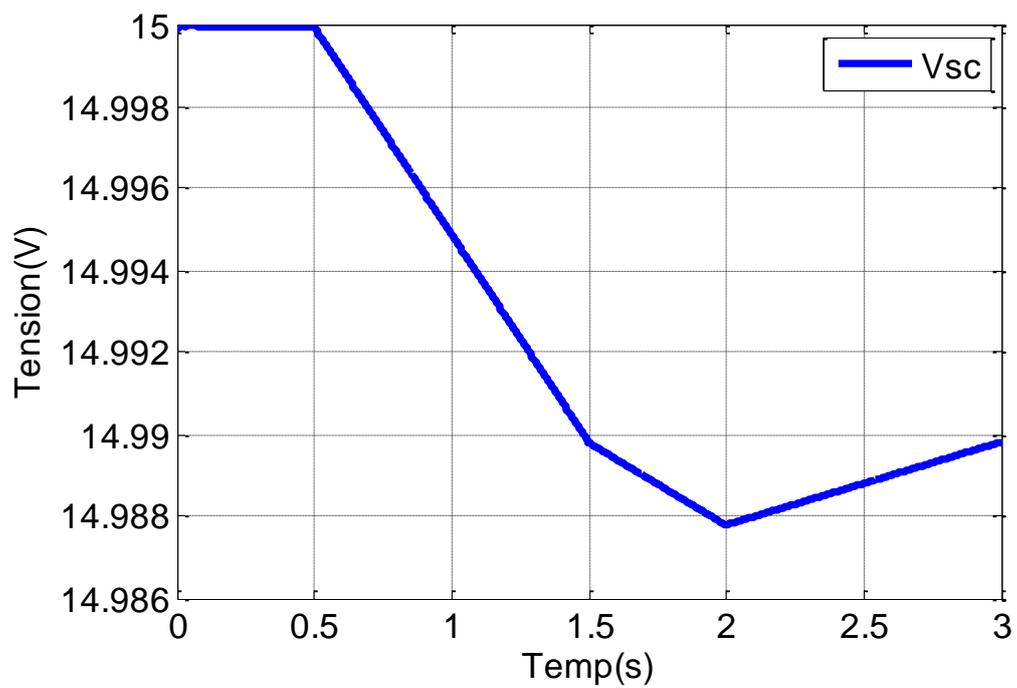


Figure III.10 - Tension de super capacité

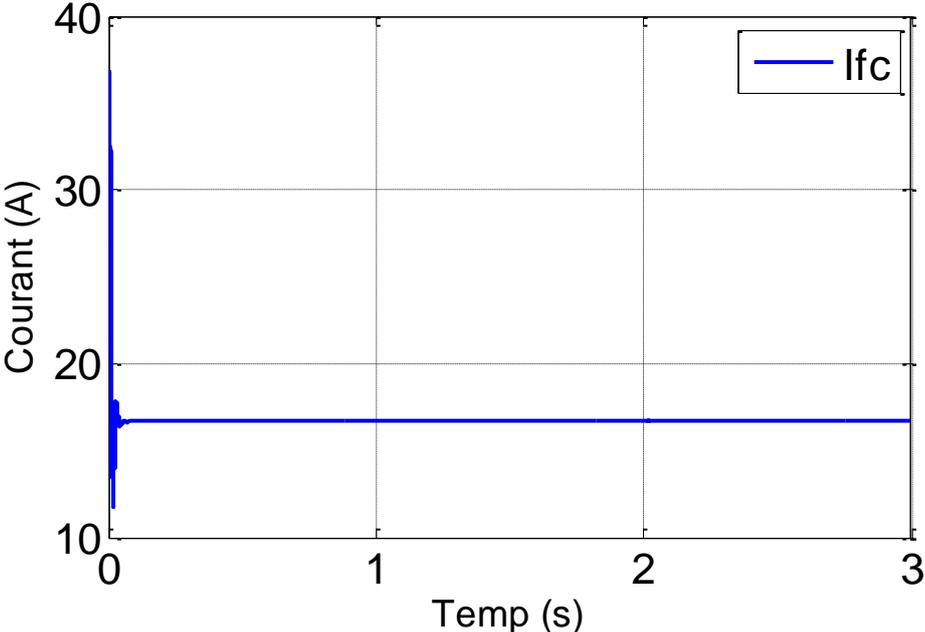


Figure III.11 - Courant de fuel cell (pile)

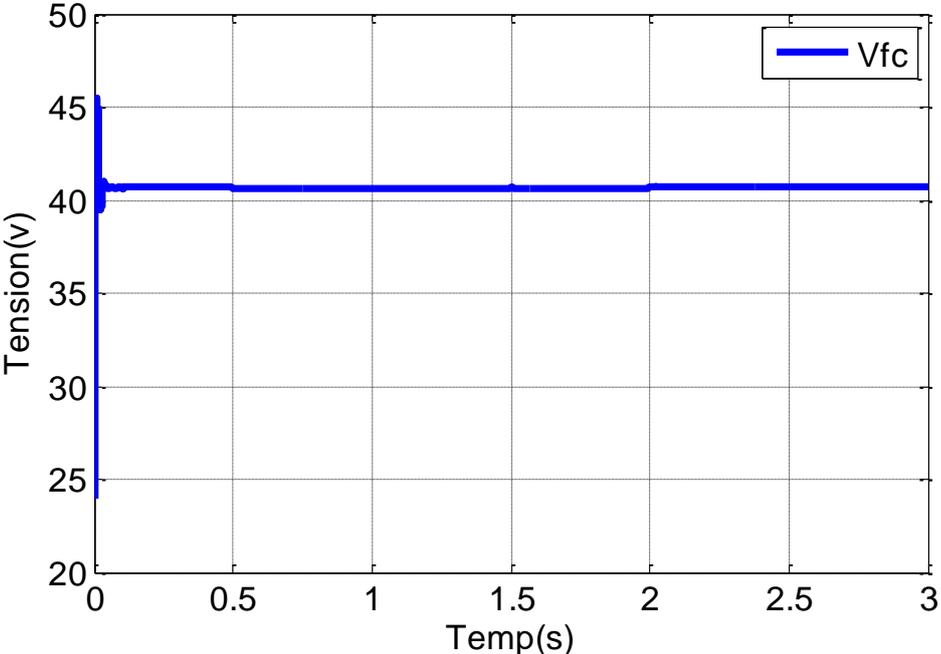


Figure III.12 - Tension de fuel cell (pile)

III.6) Interprétation des résultats :

La figure 1, est présentée, en couleur bleue la courant de charge avec différentes variations de la charge.

La figure 2, est présentée la tension du bus continu et sa référence, on observe que la tension du bus continu suit sa référence qui est égale à 24V quel que 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 6, est présenté le courant du générateur, qui est constant quel que soit les variations du la charge.

Les figures3 et 4 , sont présentées le courant de la Batteries et les super capacités ; On remarque que dans l'intervalle du temps $0,5s < t < 2s$ la puissance de la charge devient supérieure à la puissance du générateur, ceci est dû à la décharge de la batterie et la super capacité supposée déjà chargée (à $t=0$ $V_{sc}=15V$); afin de maintenir constante la tension du bus contenu. Et dans l'intervalle du temps $2s < t < 3s$ la différence entre la puissance de la charge et celle du générateur est récupérée pour recharger la super capacité. Dans la figure 5, est présentée la tension du la super capacité ; à $t=0s$ la tension est maximale et égale à 15V, c'est le phénomène inverse du courant du la super capacité. On remarque que la tension commence à diminuer légèrement jusqu'à $t=0,5s$ puis diminue rapidement (c'est la décharge) jusqu'à $t=2s$; à partir de ce moment débute le chargement de la super capacité et la tension commence à augmenter.

Conclusion :

Dans ce chapitre, la modélisation et les principes de commande de systèmes source hybride DC a été présenté. Ce système est composé d'une source principale représenté par une pile à combustible, d'une source de stockage Super Capacité et avec des batteries connecté sur une bus DC. Les modèles d'espace d'états est donnés pour le la structure étudier. Le principe de commande à base de mode glissant a été appliqué afin d'obtenir une stratégie de contrôle robuste. La surface de glissement est générée en fonction de plusieurs variables : la tension et le courant du bus continu, le courant et la tension des super condensateurs et le courant de charge. Des preuves de stabilité asymptotique globale sont données et des résultats de simulation encourageants ont été obtenus.

Conclusion générales :

Ce mémoire avait pour objectif d'établir une commande robuste et, permettant de contrôler une source hybride pour l'application véhicule hybride.

La commande utilisée a permis d'établir régulation de la tension de sortie de bus continu en tenant compte des contraintes subies par les sources et la charge.

Les sources d'énergie utilisées dans cette source hybride sont :

- Une pile à combustible de type PEM.
- Un module de super condensateurs.
- Un banc de batterie.

L'association de la commande PI avec la commande par mode de glissement a permis aux convertisseurs DC - DC du véhicule de forcer le système (pile à combustible - super condensateurs-) à suivre la tension de sortie qui a été fixé à 24 V. Les simulations ont permis de montrer la haute efficacité de la commande utilisée.

En perspective, il serait intéressant de tester d'autre type de commande et gestion de l'énergie comme par exemple la commande optimale ou la commande prédictif.

Bibliographie

- [1] Samah **SAKER** 'Modélisation et Contrôle du système, Pile à Combustible, Convertisseurs et Super condensateur 'mémoire de Magister en Electrotechnique, Université Mohamed Khider – Biskra, Faculté des Sciences et de la technologie, Année 2013.
- [2] **MOHAMED** Anis, 'Amélioration des performances d'une source de tension à base d'une pile à combustible à l'aide d'un réglage PI ', mémoire de Master en Electrotechnique, Université Mohamed Seddik Ben Yahia - Jijel Faculté des Sciences et de la Technologie, Année 2021.
- [3] **DENNI** Taqiy Eddine et **DJAOUI** Adel, 'Etude et modélisation d'une source d'énergie électrique à base d'une pile à combustible ', Université Mohamed Seddik Ben Yahia - Jijel Faculté des Sciences et de la Technologie, Année 2020.
- [4] **HAMMOUM** Malika et **HADDADI** Thafsouth 'MODELISATION ET SIMULATION D'UNE PILE A COMBUSTIBLE (SOFC)', Mémoire de Master en Electrotechnique, Université Mouloud Mammeri De Tizi-Ouzou Faculté de Génie Electrique et de l'Informatique, Année 2011/2012.
- [5] Phatiphat **THOINTHONG** 'CONCEPTION D'UNE SOURCE HYBRIDE UTILISANT UNE PILE A COMBUSTIBLE ET DES SUPERCONDENSATEURS', DOCTORAT de l'INPL En Génie électrique, Présentée à L'Institut National Polytechnique de Lorraine, le 9 décembre 2005.
- [6] Amel **LACHICHI** 'Modélisation et stabilité d'un régulateur hybride de courant - Application aux convertisseurs pour pile à combustible ', Doctorat en Génie électrique de l'Université de Franche-Comté, Année 14 novembre 2005.
- [7] Mohamed-Yacine **AYAD** 'MISE EN ŒUVRE DES SUPERCONDENSATEURS DANS LES SOURCES HYBRIDES CONTINUES 'DOCTORAT de l'INPL En Génie électrique, Présentée à L'Institut National Polytechnique de Lorraine, Année 03 Décembre 2004.
- [8] **BELLAKHDAR** Mohammed Cherif 'Etude de l'association pile PEMFC / super condensateur ' MÉMOIRE DE MAGISTER, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed BOUDIAF, Année 14/06/2013.

Bibliographie

[9] **BELHACHEMI** Farid ‘ MODELISATION ET CARACTERISATION DES SUPER-CONDENSATEURS A COUCHE DOUBLE ELECTRIQUE UTILISES EN ELECTRONIQUE DE PUISSANCE ’, DOCTORAT de l’INPL En Génie Electrique, L’Institut National Polytechnique de Lorraine, Année 19 Décembre 2001.

[10] **Alireza PAYMAN** ‘ Contribution à la gestion de l’énergie dans le system hybride Multi-sources Multi-charges’, DOCTORAT de l’INPL En Génie Electrique, L’Institut National Polytechnique de Lorraine, Année 15 Juillet 2009.

[11] **BRAHIMI SAMIR** ‘Contribution à la commande d’un système pile à combustible /super condensateur .Application au véhicule électrique’, Mémoire de Fin d’Etude d’ Ingénieur En ELECTROTECHNIQUE, UNIVERSITE MOULOU MAMMERI DE TIZI-OUZOU

[12] **Site D’internet :**

https://www.plaisance-pratique.com/IMG/pdf/nba_batteries_tubulaires.pdf

[13] **Güven ALCICEK** ‘Contribution à l’étude du vieillissement et à l’intégration des super condensateurs dans une chaîne de propulsion électrique (CPE) haute tension pour des applications véhicule électrique’, DOCTEUR DE L’UNIVERSITE DE TECHNOLOGIE DE BELFORT MONTBELIARD En Génie Électrique, Année 08 Décembre 2014.

[14] **Ilyes TEGANI** ‘Optimisation et contrôle d’un micro smart grid utilisant une pile à combustible, des super condensateurs, des batteries, une éolienne et une source photovoltaïque’, Doctorat LMD en Génie Electrique, Université Mohamed Khider – Biskra, Année 04/06/2016.

[15] **M.Y.Ayad, M. Becherif, A.Henni**, ‘Vehicle Hybridization with fuel cell , super capacitors and Batterie by sliding mode control’, University of technologie of Belfort-France, Renewable Energy 36 (2011) 2627-2634.

[16] **Walid LAJNEF** ‘Modélisation des super condensateurs et évaluation de leur vieillissement en cyclage actif à forts niveaux de courant pour des applications véhicules électriques et hybrides’, L’UNIVERSITÉ BORDEAUX 1, Doctorat en électronique, Année 2006.

[17] **Hattab MAKER** ‘ Optimisation et gestion d’énergie pour un system hybride : association Pile à combustible et super condensateurs ’, Doctorat de l’université de technologie Belfort Montbeliard, Année 4 novembre 2008.