

Université Mohamed Khider – Biskra
Faculté des Sciences et de la technologie
Département : Génie Electrique
Réf :



جامعة محمد خيضر بسكرة
كلية العلوم و التكنولوجيا
قسم: الهندسة الكهربائية
المرجع:

Mémoire présenté en vue de l'obtention
du diplôme de
Magister en : Electrotechnique

Option : Electricité Industrielle

**Modélisation et Contrôle du système, Pile à
Combustible, Convertisseurs et
Supercondensateur**

Présenté par :
Samah SAKER

Soutenu publiquement le

Devant le jury composé de :

Président	MOUSSI Ammar	Pr	Université de Biskra
Rapporteur	ABOUBOU Abdennacer	Pr	Université de Biskra
Co-Encadreur	AYAD Mohamed-Yacine	Dr	Université de Belfort
Examineur	SRAIRI Kamel	Pr	Université de Biskra
Examineur	MIMOUNESOURI Mohamed	Pr	Université de Biskra
Examineur	BAHRI Mbarek	M.C	Université de Biskra

Dédicaces

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 ce mes chères sœurs : Mouna et Meriem et mes chères frères Adelene, Abdelkader, Mohamed Islem et sife eddine.

A mes tontes et mes oncles et mes grands-mères.

A tous ma famille.

Pour tous ceux qui ont fait pour que je puisse les honorer.

A tous mes amis particulièrement : Wafa , Salima ,Khadidja, Aicha,Fahima, Samia, Mina, Kheira,..., et mes collègues.

A tous les enseignants du département d'électrotechnique ;

Je dédie ce modeste travail

SAMAH

Remerciements

LOUANGE A ALLAH "الله" QUI NOUS DONNE LA FOI, LE COURAGE, LA PATIENCE ET LA VOLONTE POUR REALISER CE MODESTE TRAVAIL DANS DES MEILLEURES CIRCONSTANCES ET EN BON ETAT.

Ce travail de thèse à été effectué au Laboratoire d'étude M.S.E du département de Génie électrique, Faculté des sciences et science de l'Ingénieur, Université Mohammed Khider de Biskra.

- ✓ Mes respectueux remerciements s'adressent à mon directeur de thèse **Monsieur Abdennacer ABOUBOU Maître de Conférences du département de génie électrique de l'Université de Biskra**, et le Co-Encadreur de thèse, Docteur **Mohamed-Yacine AYAD de l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard en France** pour avoir dirigé mes travaux de recherche ainsi que pour leurs disponibilités, leur patience et leurs précieux conseils, leurs encouragements et les efforts qu'il m'a prodigués durant la réalisation de ce travail.
- ✓ Meilleurs salutations aux membres du jury de thèse pour l'honneur qu'ils m'ont fait de participer à l'évaluation de mon travail.
- ✓ J'exprime aussi mes vifs remerciements au Directeur du laboratoire L.M.S.E. de Biskra **Monsieur BAHRI Mebarek** pour les facilités et la mise à disposition des moyens du laboratoire.

Je tiens à exprimer encore mes sincères remerciements au :

- ✓ Docteur **Mohamed BECHRIF** de l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard en France.
- ✓ **MOHAMMEDI Messaoud** Maitre Assistant de l'Université de Biskra département de génie électrique.
- ✓ **SAADI Aicha** maitre assistant a l'université de Biskra département de génie électrique
- ✓ Toutes les personnes qui de près ou de loin m'ont aidée à finaliser travail.
- ✓ Tous les enseignants du département de Génie électrique.
- ✓ A mes chers parents.

Remerciements

- ✓ A mes chéris frères et sœurs
- ✓ Ma famille.
- ✓ A mes collègues.
- ✓ A tous mes amis.

Sommaire général

Introduction générale.....	1
Chapitre I : Véhicule hybride	
I.1 Introduction	3
I.2 Véhicule hybride à pile à combustible.....	3
I.3 Les composants du véhicule hybride	6
I.3.1 Le Moteur électrique	7
I.4 Problématique du contrôle des véhicules hybrides	8
I.4.1 Les différentes architectures hybrides	
I.4.1.1 Hybride série.....	8
I.4.1.2 Architecture parallèle	10
I.4.2 Les modes de fonctionnement	12
I.4.2.1 Le Stop-and-Start.....	12
I.4.2.2 Le mode régénération	12
I.4.2.3 Le mode freinage récupératif	12
I.4.2.4 Le mode boost	12
I.4.2.5 Le mode alternateur.....	13
I.4.2.6 Le mode thermique pur.....	13
I.4.2.7 Le mode électrique pur.....	13
I.5 Principaux types de véhicules hybrides	13
I.5.1 Le véhicule électrique avec prolongateur d'autonomie	14
I.5.2 Le véhicule thermique assisté électriquement	14
I.5.3 Le véhicule électrique hybride proprement dit.....	14
I.6 Le véhicule à pile à combustible chez les différents constructeurs.....	16
I.7 Conclusion.....	17
Chapitre II : Généralité sur la pile à combustible	
II.1 Introduction.....	18
II.2 LA Pile à Combustible.....	18
II.2.1 Historique	18
II.3 LA PILE À COMBUSTIBLE À MEMBRANE POLYMÈRE (TYPE PEM).....	20
II.3.1 Principe de fonctionnement.....	20
II.3.2 Les différents types de piles à combustible	22
II.4 Hydrogène	24
II.5 Construction de pile à combustible de type PEM.....	25
II.5.1 L'alimentation des piles en combustible	25

II.6 SYSTEME PILE A COMBUSTIBLE EMBARQUE	25
• Le conditionnement entrée-sortie cathode	26
• Le conditionnement entrée-sortie anode.....	27
• Le refroidissement et l'humidification.....	27
• La conversion et l'exploitation de l'énergie électrique.....	27
II.7 APPLICATIONS DES PILES A COMBUSTIBLES	28
II.7.1 Applications portables.....	28
II.7.2 Applications stationnaires	28
II.7.3 Applications embarquées	29
II.7.3.1 Véhicules légers.....	29
II.7.3.2. Véhicules lourds.....	29
II.8 Les rendements de fonctionnement des PAC.....	30
II.9 MODELE ELECTROCHIMIQUE DE LA PILE A COMBUSTIBLE PEMFC	31
II.9.1 Le modèle statique de Larminie and dicks.....	31
II.9.1.1 Pertes d'activation	32
II.9.1.2 Pertes ohmique	33
II.9.1.3 Pertes de concentration	33
II.9.1.4 Les paramètres de la pile	33
II.9.2 Le schéma de simulation	34
II.9.3 Les résultats du la simulation.....	34
II.10 Avantages et inconvénients des piles à combustible de type PEM	36
II.10.1 Avantages des piles à combustible de type PEM	36
II.10.2 Inconvénients des piles à combustible de type PEM	36
II.11 Conclusion	37
Chapitre III : Généralités sur les supercondensateurs	
III.1 INTRODUCTION	38
III.2 Principe de fonctionnement.....	38
III.3 Applications courantes des supercondensateurs	40
III.4 Type de stockeur d'énergie.....	41
III.4.1 Stockeur d'énergie fixe	41
III.4.2 Stockeur d'énergie embarqué	42
III.5 Comparaison entre les batteries et les supercondensateurs.....	43
III.6 Supercondensateurs : avantages, inconvénients	45
III.6.1 Les avantages.....	45
III.6.2 Les inconvénients.....	45
III.7 Modélisation comportementale des super condensateurs	45
III.7.1 Modélisation des Supercondensateurs	46
III. 7.2 Modèle d'une cellule sans branche lente	48
III.8 Conclusion.....	50

Chapitre IV : Commande de la source hybride : pile à combustible/supercondensateurs

IV.1 Introduction.....	51
IV.2 Source embarqué utilisant une Pile à combustible.....	51
IV.2.1 Modélisation du hacheur survolteur.....	51
IV.2.2 Commande du hacheur survolteur	52
IV.3 Schéma de simulation	54
IV.4 Résultat de la simulation	55
IV.5 Interprétation des résultats	56
IV.6 Commande des convertisseurs DC-DC par mode glissant	57
IV.6.1 Objectif de la commande par mode glissant.....	57
IV.6.2 PRINCIPE DU REGLAGE PAR MODE GLISSANT	57
IV.6.3 Système à structure variable	59
IV.6.3.1 Configuration avec changement de la structure par commutation d'une contre-réaction d'état variable	59
IV.6.3.2 Configuration avec changement de la structure par commutation au niveau de l'organe de commande	60
IV.6.4 CONDITIONS D'EXISTENCE DU MODE GLISSANT	60
IV.6.5 Fonction de LYAPUNOV	61
IV.7 Source embarqué utilisant une pile à combustible et des supercondensateurs	63
IV.7.1 Modélisation de système	63
IV.7.2 Application de la commande mode glissement.....	64
IV.7.3 Le schéma de simulation	66
IV.7.4 Les résultats de simulation	67
IV.7.5 Interprétation des résultats	68
IV.6 Les paramètre	69
IV.7 Conclusion	71
Conclusion générale	72
Références Bibliographiques	

Liste des tableaux

Tab.I.1: Flux énergétiques au sein du groupe motopropulseur.....	5
Tab. I.2 : Caractéristiques générales des moteurs électriques synchrone et asynchrone...	8
Tab.I.2 : Exemples de véhicules à pile à combustible.....	15
Tab.II.1 : Différents types de piles à combustible.....	23
Tab.III.1 : comparaison entre les éléments de stockage.....	44

Liste des figures

Fig. I.1: Exemple d'architecture de véhicule à pile à combustible hybride	06
Fig. I.2 : Véhicule hybride série	09
Fig. I.3 :L'architecture hybride parallèle simple arbre	10
Fig. I.4 : l'architecture double arbre	11
Fig. I.5: L'architecture hybride combinée.	11
Fig. I.6 : Spectre des différents types d'hybrides.	13
Fig. 1.7 : Véhicules de petite série Silverado et Equinox de Chevrolet	16
Fig. II.1 : L'expérience de Sir William Grove /ClubPac/	19
Fig .II.2 : Principe de la réaction catalytique dans l'électrode volumique	21
Fig. II.3 : schéma de principe d'une pile a combustible PEMFC	22
Fig.II.4 : schéma du principe de fonctionnement d'une pile	24
Fig.II.5: Schéma des PAC fonctionnant à haute température et à reformage interne de l'hydrogène	25
Fig.II.6 : Schéma illustrant les différents éléments d'un système PàC	26
Fig. II.7 : Comparaison de la performance des PAC à la performance d'autre système de production de puissance (Fuel Cell Handbook, 2000)	30
Fig.II.8 : Caractéristique Tension-courant d'une pile PEM	32
Fig II.9. Le schéma de la simulation au MATLAB	34
Fig.II.10.Caractéristique statique de la pile PEM 500 W du GREEN	34
Fig.II.11.la puissance de la pile PEM 500 W du GREEN	35
Fig. II.12: Photographie d'une pile à combustible PEM du constructeur ZSW (20 cellules ; puissance nominale de 500W) sur le banc d'essais 1kW de la plateforme de Belfort	35
Fig.III.1 Principe de la couche double électrique	39
Fig. III.2 : Structure interne des supercondensateurs à couche double électrique	40
Fig. III.3 : Pack de supercondensateurs dédié çà la récupération de l'énergie lors du freinage	41
Fig.III.4 : Système MITRAC utilisant les supercondensateurs pour le stockage de l'énergie	42
Fig.III.5: Schéma comparatif	44
Fig.III.6 : Modèle des supercondensateurs à deux branches RC	47
Fig. III.7: Modèle de R. Bonert et L. Zubieta	47
Fig.III.8: Modèle de la cellule sans branche lente	48

Liste des figures

Fig.III.9 : La tension V_{cel} (V) a une valeur initiale égale à 1V chargé complète d'un courant du 100A	49
Fig.III.10 : chargement de la capacité pendant les (5s) la valeur initiale de la tension égale à 0V	49
Fig.IV.1 : Schéma électrique du convertisseur	51
Fig.IV.2: Régulation de la tension du bus par hacheur	53
Fig.IV.3: Régulation de la tension du bus par hacheur	53
Fig.IV.4 : MATLAB/Simulink modèle de la PEM avec boost convertisseur	54
Fig.IV.5 : Contrôle du convertisseur de la pile	55
Fig. IV.6 : La puissance de générateur avec la puissance de charge	55
Fig.IV.7 : La tension du bus continu avec la référence	55
Fig.IV.8:le courant du générateur avec la référence	56
Fig.IV.9:la tension de la pile à combustible	56
Fig. IV.11 : Système de réglage à structure variable avec changement de la structure par commutation d'une contre réaction d'état variable.	59
Fig.IV.12 Configuration avec changement de structure par commutation de l'organe de commande.	60
Fig. IV.13 Démonstration du mode de glissement	61
Fig. IV.14 : Trajectoire de l'état vis-à-vis la surface de glissement	62
Fig. IV.15 : La Structure d'hybride source	63
Fig.IV.16 : Contrôle du convertisseur des supercondensateurs	64
Fig.IV.17 : MATLAB/Simulink modèle de la PEM avec boost convertisseur	66
Fig.IV.18 : La puissance de la charge et la puissance de générateur	67
Fig.IV.19 La tension du bus continu et la référence de cette tension	67
Fig.IV.20 : Le courant du générateur	67
Fig.IV.21 : Le courant de la supercapacité	68
Fig.IV.22 : La tension du supercondensateur	68

Induction générale:

Dans les prochaines décennies, la stagnation probable de la production de pétrole entre 2020 et 2030, la concentration de la production du pétrole brut au Proche Orient et les conséquences du changement climatique obligeront les gouvernements à employer l'énergie de façon plus efficace et à recourir à de nouvelles sources d'énergie moins polluantes. L'hydrogène se présente comme une solution portable. Sa capacité de stockage, de l'ordre de 30000 Wh/Kg, a conduit au développement de nouvelles technologies à base de piles à combustible. L'application des piles à combustible s'étend sur plusieurs domaines : stationnaires ou embarquées [1].

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 .

Si les véhicules hybrides sont mondialement commercialisés, les véhicules à pile à combustible restent au niveau prototypes bien que la plupart des grands constructeurs automobiles soient impliqués dans une phase de recherche et de développement dessus. Une des situations idéales visées serait la production de l'hydrogène à partir de l'électrolyse de l'eau moyennant les énergies renouvelables tel l'énergie solaire, éolienne, hydraulique ou géothermique, son stockage et sa distribution dans des stations venant remplacer les stations à essence existants partout. [2].

Dans un futur proche, l'utilisation des systèmes hybrides électriques deviendra plus importante, ce phénomène s'expliquant par la réduction de la production de pétrole et la demande de réduction des émissions de gaz dangereux. Le plus souvent, les sources électriques diverses comme les systèmes photovoltaïques, les piles à combustibles ou les éoliennes, les organes de stockage comme les batteries ou les supercondensateurs sont présents en nombre dans ce type de système [3].

Introduction générale

Cette thèse 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 supercondensateurs, 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 les véhicules hybrides d'une façon générale, leurs différentes configurations d'hybridation, leurs modes de fonctionnement ainsi que les principaux types utilisés.

Le deuxième chapitre, a été dédié à la pile à combustible, son principe de fonctionnement, les différents types ainsi que sa modélisation statique et sa simulation par MATLAB.

Dans le troisième chapitre, à été présenté une théorie sur les supercondensateurs ; leurs principe de fonctionnement et les applications courantes, puis la modélisation mathématique et la simulation par MATLAB.

Le quatrième chapitre traite la commande de la source hybride et comporte deux parties importantes :

1. La modélisation mathématique de la pile PEMFC avec un hacheur boost, en utilisant le sumilink-MATLAB.
2. La structure hybride des deux sources : la pile PEMFC avec la supercapacité en utilisant un hacheur « boost » pour contrôler la pile par un simple régulateur PI, et un autre hacheur « buck-boost » pour contrôler le supercondensateur par une commande robuste qui est la commande par mode glissant.

Enfin une conclusion générale et des perspectives.

Chapitre I: Véhicule hybride

Chapitre I: Véhicule hybride

I.1 Introduction

Au cours de ce premier chapitre, nous allons placer l'étude dans son contexte général tout en décrivant brièvement les différents éléments mis en jeu au cours de cette étude. Partant du principe même du développement durable, nous abordons le domaine du transport avec un bref état de l'art des véhicules hybrides conventionnels. Nous introduisons ensuite les véhicules à pile à combustible en tant que véhicules hybrides de configuration série dans lesquels une pile à combustible vient remplacer l'ensemble moteur thermique et générateur électrique. Le principe de fonctionnement de la pile est décrit ici, partant du cœur de pile, en passant par le système pile et ses auxiliaires, jusqu'au groupe électrogène combinant le système pile et un élément de stockage. La problématique traitée dans cette étude, qui n'est autre que la gestion optimale de l'énergie électrique dans ce groupe électrogène, est ensuite introduite [2].

I.2 Véhicule hybride à pile à combustible

Une automobile hybride est un véhicule faisant appel à plusieurs sources d'énergie distinctes pour se mouvoir. Le concept d'un véhicule hybride électrique remonte aux débuts de l'histoire de l'automobile sauf que le but principal n'était pas de réduire la consommation de combustible mais plutôt d'aider le moteur à combustion interne, à cette époque à faible performance, à assurer un niveau acceptable de compétences. A ce propos, si les premiers véhicules hybrides étaient montrés au salon de Paris en 1899, ce n'est qu'à la fin du 20ème siècle, précisément en 1997, que la commercialisation des premières voitures hybrides a commencé avec la Toyota Prius et la Honda Insight. [2]

Dans un véhicule à pile à combustible hybride, c'est la source de puissance qui est hybride, la motorisation restant entièrement électrique. Un véhicule à pile à combustible hybride utilise donc une source secondaire d'énergie électrique réversible en puissance (fonctionnement en charge et en décharge). Les rôles de la source secondaire d'énergie sont : [11]

- Assister en puissance la pile à combustible :

La source secondaire fournit le complément de puissance lorsque la pile atteint sa puissance maximale (par exemple lors d'accélération du véhicule).

Chapitre I : Véhicule hybride

- Récupérer l'énergie cinétique lors des freinages :

La récupération de l'énergie cinétique lors des phases de freinage permet d'économiser de l'hydrogène et d'augmenter l'autonomie du véhicule.

- Introduire un degré de liberté dans la répartition des puissances :

L'hybridation permet de répartir la demande de puissance entre le système pile à combustible et la source secondaire d'énergie. Les points de fonctionnement du système PAC peuvent ainsi être déplacés vers les zones de meilleurs rendements en utilisant des stratégies de commande adaptées, ce qui permet de réduire la consommation d'hydrogène.

Au sein du groupe motopropulseur d'un véhicule à pile à combustible hybride (Fig. I.1), plusieurs modes d'opérations peuvent être identifiés. Ces modes d'opérations (traction, freinage, arrêt) induisent des flux énergétiques différents (Tab. I.1).

Chapitre I : Véhicule hybride

Mode	Puissance	Schéma des flux énergétiques	Description
Traction	$P_{ME} > 0$ $P_{sysPAC} > 0$ $P_{SSE} = 0$		Le système PAC alimente seul la machine électrique.
	$P_{ME} > 0$ $P_{sysPAC} > 0$ $P_{SSE} > 0$		Le système PAC et la source secondaire alimentent ensemble la machine électrique.
	$P_{ME} > 0$ $P_{sysPAC} = 0$ $P_{SSE} > 0$		La source secondaire alimente seule la machine électrique.
	$P_{ME} > 0$ $P_{sysPAC} > 0$ $P_{SSE} < 0$		Le système PAC alimente la machine électrique et recharge la source secondaire.
Freinage	$P_{ME} < 0$ $P_{sysPAC} = 0$ $P_{SSE} < 0$		La source secondaire récupère l'énergie cinétique de freinage.
	$P_{ME} < 0$ $P_{sysPAC} > 0$ $P_{SSE} < 0$		La source secondaire récupère l'énergie cinétique de freinage et reçoit également de la puissance du système PAC.
Arrêt	$P_{ME} = 0$ $P_{sysPAC} = 0$ $P_{SSE} = 0$		Aucun flux énergétique.
	$P_{ME} = 0$ $P_{sysPAC} > 0$ $P_{SSE} < 0$		Le système PAC recharge la source secondaire.

sysPAC : système PAC.

SSE : source secondaire d'énergie.

ME : machine électrique.

Tab. I.1: Flux énergétiques au sein du groupe motopropulseur [4].

Chapitre I : Véhicule hybride

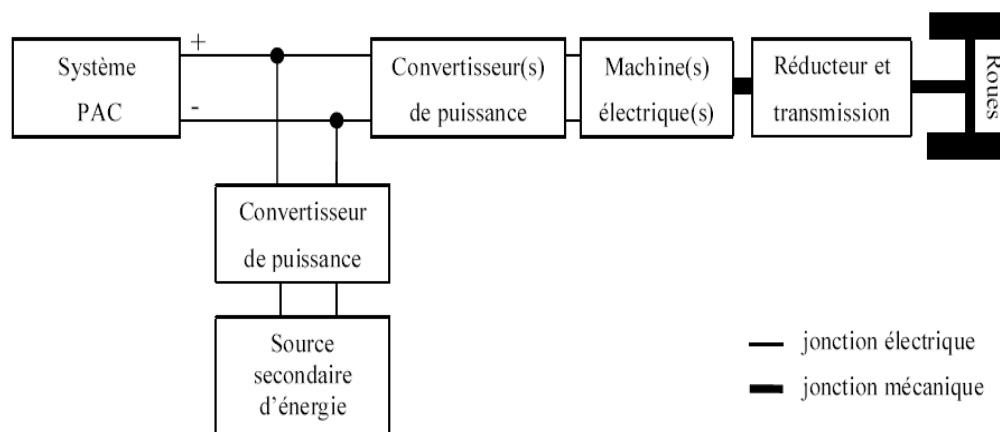


Fig. I.1: Exemple d'architecture de véhicule à pile à combustible hybride. [5]

I.3 Les composants du véhicule hybride [6]

Les véhicules hybrides thermiques-électriques sont des véhicules intermédiaires entre les véhicules conventionnels et les véhicules électriques. Ils sont constitués des mêmes éléments que ceux des véhicules conventionnels c'est-à-dire :

- un transformateur irréversible d'énergie tel qu'un moteur thermique ou un pack de piles à combustible ;
- son stockage d'énergie non réversible associée (essence, gazole, gazole de synthèse, gaz de pétrole liquéfié, hydrogène, méthane, air comprimé, etc.) ;
- le système de transmission (courroie, boîte de vitesse et liaisons aux roues motrices),
- les freins mécaniques dont la gestion peut être optimisée.

A cela est ajouté un réseau électrique de bord de plus ou moins haut tension selon le taux d'hybridation du véhicule.

Ce réseau électrique, similaire à celui d'un véhicule électrique, est constitué :

- d'un ou plusieurs transformateurs réversibles (ou non) d'énergie électrique : moteurs électriques et génératrices (ou alternateurs) ;
- d'un stockage réversible d'énergie : le stockage électrochimique est de loin le plus
- de convertisseurs statiques adaptant la tension entre les différents éléments de stockage et de transformation de l'énergie ainsi qu'entre le réseau de puissance et le circuit électrique de bord ;
- d'un calculateur qui assure la gestion de l'énergie.

Chapitre I : Véhicule hybride

I.3.1 Le Moteur électrique [7]

Lors qu'on s'intéresse au véhicule hybride ou électrique, plusieurs critères pour le choix du ou des moteurs sont à examiner :

- le rendement
- la puissance massique et volumique ;
- le coût de la commande rapprochée associée ;
- l'entretien.

Les moteurs à courant continu ne sont plus guère utilisés, car :

- ✓ ils ont une puissance massique défavorable et sont d'une construction complexe donc prohibitive ;
- ✓ le système collecteur/balais demande un entretien régulière (pour un véhicule électrique, tous les 10000 Km environ selon ;
- ✓ l'avantage de la simplicité de leur commande est devenu obsolète, de puis d'avènement de composants d'électronique de puissance toujours plus performants et meilleurs marché.

Les moteurs utilisés dans la traction automobile aujourd'hui sont principalement de type synchrone à aimant. En effet, ils se démarquent par un rendement et une puissance volumique élevés.

De plus, l'absence de bague collectrice permet de minimiser les opérations d'entretien.

Certains prototypes sont à l'étude, notamment à réluctance variable chez Valeo. Cependant, il reste à voir si les désavantages classiques de ce type de technologie, c'est-à-dire les variations, les harmoniques à haute fréquence, et les à coups à basse vitesse, pourront être contournés.

Dans le tableau (Tab.I.2) sont indiquées les caractéristiques des technologies synchrone et asynchrone :

Chapitre I : Véhicule hybride

Type de moteur	asynchrone	synchrone	
		A aimant permanent	bobiné
Construction	simple	Assez complexe	complexe
Puissance massique et volumique	bon	excellente	médiocre
Rendement	bon	excellente	bon
Fonctionnement à grandes vitesses	excellente	médiocre	bon
Entretien	inutile	inutile	utile
Fiabilité	excellent	bonne	excellente
Coût	moyen	grand	grand

Tab. I.2 : Caractéristiques générales des moteurs électriques synchrone et asynchrone [7].

I.4 Problématique du contrôle des véhicules hybrides

I.4.1 Les différentes architectures hybrides

On distingue trois grandes familles d'architecture : série, parallèle et combinée. Une manière de différencier les deux premières est de considérer la nature du point de jonction entre les différentes chaînes de traction, appelé 'nœud'. Dans l'architecture 'Série', le nœud est électrique, dans l'architecture parallèle, il est mécanique. [30]

I.4.1.1 Hybride série

Ce type de véhicule est équipé d'une propulsion électrique (voir la Fig. I.1) qui est assurée par un ou plusieurs moteurs électriques. Une source auxiliaire d'énergie permet d'effectuer les opérations de démarrages du véhicule. La source principale d'énergie assure la recharge de la source auxiliaire d'énergie et l'alimentation de la motorisation électrique. Quand on a besoin d'énergie supplémentaire, pour les reprises lors des dépassements ou dans les côtes par exemple, c'est la source auxiliaire d'énergie qui fournit ce supplément d'énergie. Le moteur thermique peut être un moteur Diesel ou à essence mais d'autres solutions sont envisagées, comme les batteries, la turbine et la pile à combustible.

Chapitre I : Véhicule hybride

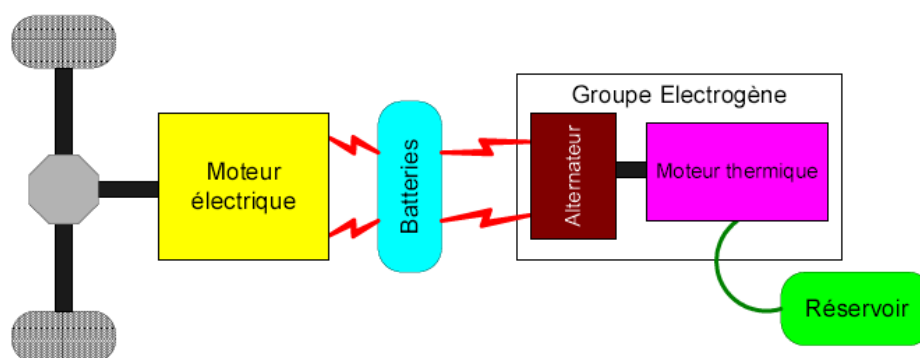


Fig. I.2 : Véhicule hybride série. [8]

Parmi les avantages du véhicule hybride série nous citons :

- La source principale d'énergie peut être un moteur thermique (connecté à une génératrice), des batteries, une pile à combustible....
- La liaison mécanique entre l'arbre moteur et l'axe des roues motrices est assurée via une simple boîte de vitesse.
- La possibilité d'utilisation de stratégies de contrôle simples.
- La possibilité d'utiliser deux moteurs ou même quatre, au lieu d'un, sans complexité au niveau de la transmission de la puissance aux roues.

Et parmi les inconvénients du véhicule hybride série nous citons :

- Des frais supplémentaires concernant le prix et le poids de la génératrice couplée au moteur thermique.
- Les pertes énergétiques dues à la conversion de l'énergie mécanique du moteur thermique à l'énergie électrique via la génératrice électrique.
- Le moteur de traction doit être dimensionné pour répondre à la forte demande de puissance, car il est seule source d'énergie reliée aux roues.

Un des inconvénients majeur de ce type d'architecture est le faible rendement global de l'ensemble car la puissance mécanique délivrée par le moteur thermique est tout d'abord convertie en puissance électrique par l'alternateur, éventuellement stockée dans les batteries, puis reconvertie en puissance mécanique par le moteur électrique. Cependant, du point de vue de la commande, cette architecture offre deux degrés de liberté : le régime et le couple du moteur thermique peuvent être choisis quasiment indépendamment des conditions de conduite.

Chapitre I : Véhicule hybride

I.4.1.2 Architecture parallèle :

Pour l'architecture parallèle, le point de jonction entre les différentes chaînes de traction est cette fois mécanique. Lorsque les différents moteurs sont solidaires du même arbre, via une boîte à vitesse permet la transmission de la puissance aux roues Fig. I.3, on parle d'architecture hybride parallèle simple arbre [8].

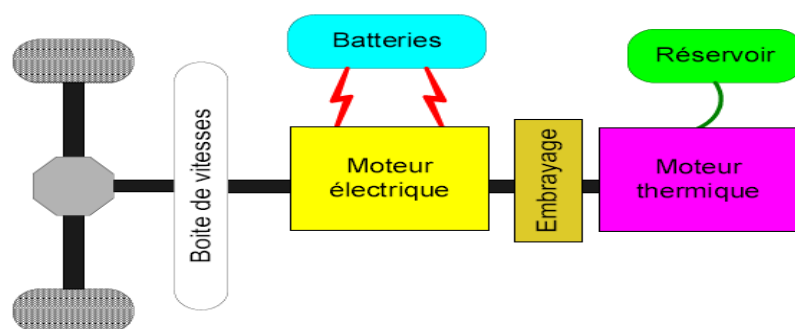


Fig. I.3 :L'architecture hybride parallèle simple arbre

Lorsque le moteur électrique a une très faible puissance, on parle alors d'alternateur-démarrage et celui-ci est placé avant l'embrayage. Dans ce cas, la propulsion est quasi intégralement assurée par le moteur thermique et l'alternateur-démarrage n'est utilisé que dans la phase de démarrage du moteur thermique. Le moteur thermique est arrêté dès que le véhicule est arrêté afin de réduire la consommation et les émissions de polluants. Lors des phases de démarrage, le moteur thermique pouvant être entraîné à régime beaucoup plus élevé qu'avec un démarreur classique, les émissions de polluants sont réduites de manière significative.

Lorsque les deux moteurs ont des puissances similaires, le moteur électrique est placé entre l'embrayage et la boîte de vitesses. Les régimes des deux moteurs sont linéairement dépendants du régime des roues. Il s'agit alors de répartir le couple aux roues nécessaire à la propulsion du véhicule entre les deux moteurs, en tenant compte des rapports de boîte. L'un des inconvénients inhérent à cette architecture est la perte de couple aux roues apparaissant lors des changements de rapports, qui dégrade le confort de conduite.

Pour remédier à cet inconvénient, la boîte de vitesses peut être remplacée par un variateur continu de vitesse. Le moteur électrique peut également être connecté sur un arbre différent, on parle dans ce cas d'architecture double arbre, Fig. I.4. On s'aperçoit que le dimensionnement des composants et la répartition de puissance sur les deux chaînes de traction sont moins contraints.

Dans l'architecture double arbre, les deux moteurs ont des régimes indépendants et à tout moment la traction du véhicule est assurée par un des deux moteurs.

Chapitre I : Véhicule hybride

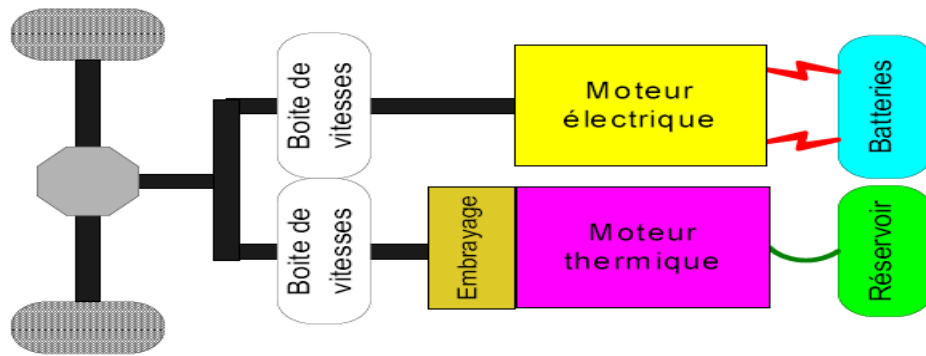


Fig. I.4 : l'architecture double arbre

Lorsque le moteur électrique est relié directement aux roues, pour assurer une réduction de consommation de carburant et des émissions de polluants significative, sa puissance doit être relativement importante. L'utilisation d'un moteur électrique de moindre puissance reste possible si une deuxième boîte de vitesses est ajoutée, Fig. I.4. Cependant, pour des raisons de coût et de complexité mécanique cette dernière solution semble difficilement envisageable.

Dans les architectures simple et double arbre, le couple aux roues résulte de l'addition des couples fournis par les moteurs (aux rapports de réduction près). L'architecture combinée met en œuvre un train planétaire afin de réaliser une addition de vitesse, Fig. I.5.

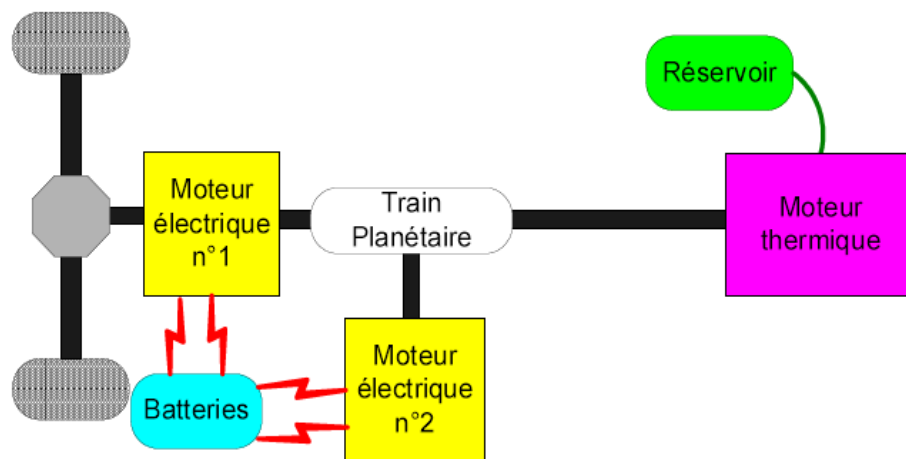


Fig. I.5: L'architecture hybride combinée.

Si seulement un moteur thermique et un moteur électrique sont utilisés, le seul degré de liberté est le choix des régimes de chacun des moteurs. Par contre, si un deuxième moteur électrique est ajouté, Fig. I.5, alors le couple et le régime du moteur thermique peuvent être choisis presque indépendamment des conditions de conduite (vitesse du véhicule, couple demandé aux roues par le conducteur).

Chapitre I : Véhicule hybride

Cette liste d'architectures est loin d'être exhaustive, mais représente les configurations les plus utilisées. D'autres ont été proposées mais elles sont généralement plus complexes (plusieurs embrayages, 3 moteurs électriques, etc.) [8].

I.4.2 Les modes de fonctionnement [9]

I.4.2.1. Le Stop-and-Start Nommé aussi Stop-and-Go ou Stop-Start selon les constructeurs, ce système permet au moteur thermique d'être démarré rapidement, et sans vibration, après un arrêt de courte durée.

Cette fonctionnalité est en particulier destinée à être utilisée lors d'arrêt aux feux rouges, ou bien dans des embouteillages. Le gain apporté par ce système provient de la disparition de la consommation de carburant au ralenti, lorsque le moteur thermique n'est pas utilisé pendant plusieurs secondes. En contrepartie, une faible quantité d'énergie électrique est utilisée à chaque démarrage pour ramener le moteur à son régime de ralenti.

I.4.2.2 Le mode régénération : Dans ce mode, le moteur électrique fournit un couple négatif, le moteur thermique fournissant alors un couple supérieur au couple de consigne (demandé par le conducteur). L'énergie provenant du moteur électrique est ensuite stockée dans les batteries, afin d'être réutilisée ultérieurement.

I.4.2.3 Le mode freinage récupératif : Il s'agit du fonctionnement d'un moteur électrique utilisé pour fournir un couple résistant, dans le but de récupérer l'énergie cinétique du véhicule sous la forme d'une énergie électrique, qui est ensuite stockée.

I.4.2.4 Le mode boost : Le mode boost correspond à une assistance du moteur thermique par le moteur électrique, celui-ci développant un couple positif conjointement au moteur thermique. Ce mode peut être actionné pour décharger le moteur thermique afin de placer celui-ci sur un point de fonctionnement de meilleure efficacité. Il peut aussi être utilisé lors d'une importante demande de couple, lorsque le moteur thermique développe un couple insuffisant par rapport au couple de consigne.

I.4.2.5 Le mode alternateur Le mode alternateur correspond au fonctionnement classique d'un alternateur que l'on trouve sur chaque véhicule. Au lieu d'imposer un couple au moteur électrique, on impose une consigne de tension aux bornes de la batterie (ou aux bornes de la supercapacité), le moteur électrique se chargeant ensuite de réguler cette tension. Ce mode n'est

Chapitre I : Véhicule hybride

pas optimal d'un point de vue énergétique, puisqu'il est utilisé, sur les véhicules traditionnels, quel que soit le point de fonctionnement du moteur thermique, même lorsque celui-ci est au ralenti.

I.4.2.6 Le mode thermique pur Il s'agit du mode classique durant lequel le moteur électrique n'est pas utilisé. Ce mode peut être utilisé pour des raisons de rendement (par exemple, lors d'un trajet sur autoroute, pour lequel le moteur thermique est utilisé à un bon rendement), ou bien parce que la batterie est déchargée.

I.4.2.7 Le mode électrique pur Il s'agit du mode pour lequel le moteur thermique est arrêté. Dans ce mode, les conséquences directes sont l'absence de bruit, l'absence de rejet de polluants ("zéro émission"), et une consommation de carburant nulle. La durée durant laquelle ce mode pourra être actif dépend de la capacité de la batterie. Si celle-ci est faible, ce mode pourra être activé durant quelques minutes tout au plus, le moteur thermique devant alors être rallumé pour ramener la batterie à un état de charge correct.

I.5.Principaux types de véhicules hybrides [10]

Comme le montre la Fig. I.6, trois types de véhicules électriques hybrides sont communément identifiés suivant le poids relatif des deux sources d'énergie : le véhicule électrique avec prolongateur d'autonomie, le véhicule thermique assisté électriquement et le véhicule hybride proprement dit.

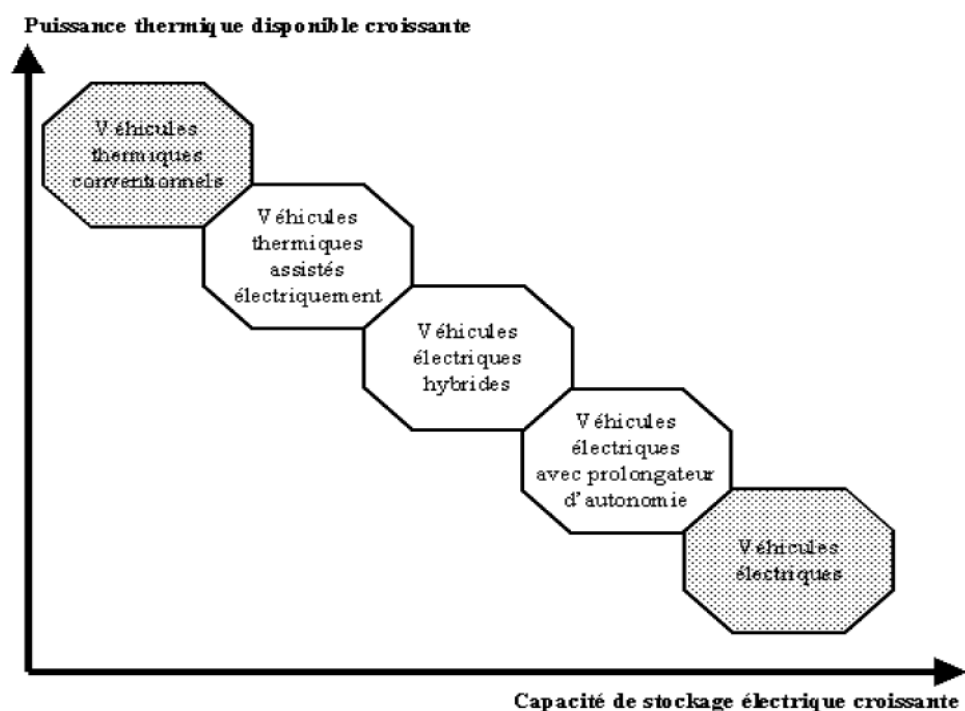


Fig. I.6 : Spectre des différents types d'hybrides.

Chapitre I : Véhicule hybride

I.5.1. Le véhicule électrique avec prolongateur d'autonomie :

Le véhicule électrique avec prolongateur d'autonomie ou range extender, est un hybride de type série, avec une utilisation très proche du véhicule électrique. Il s'en distingue par une capacité à rouler hors des plages d'autonomie de la batterie. Pour cela, il est équipé avec une batterie de grande taille et un petit moteur thermique. Suivant l'option choisie, le moteur thermique peut fournir la puissance permettant au véhicule de continuer à fonctionner lorsque la batterie est déchargée, mais avec un niveau de puissance maximale réduit : le véhicule est alors majoritairement utilisé comme un véhicule électrique. Une autre solution consiste à fournir la puissance moyenne nécessaire au fonctionnement du véhicule par le moteur thermique et le complément par rapport à la puissance demandée par la batterie. Le fonctionnement du véhicule dans ce cas est majoritairement effectué en mode hybride [10].








I.5.2. Le véhicule thermique assisté électriquement :

Situé à l'autre bout du spectre des hybrides et très proche du véhicule conventionnel, le véhicule thermique assisté électriquement ou power assist utilise un système de propulsion électrique en plus du moteur thermique pour diminuer les émissions et la consommation de carburant ; c'est un hybride de type parallèle. Le moteur thermique doit dans ce cas être capable de fournir la puissance moyenne nécessaire au véhicule pour fonctionner dans toutes les conditions de circulation [10].

I.5.3. Le véhicule électrique hybride proprement dit :

Le véhicule électrique hybride désignera par la suite un véhicule possédant deux sources d'énergie d'égale importance. Cet hybride a donc la capacité de rouler uniquement en électrique grâce à une batterie permettant de parcourir une distance en tout électrique significative et possède un moteur thermique suffisamment important pour fournir la puissance nécessaire à toutes les conditions de circulation. C'est l'hybride le plus flexible puisqu'il peut opérer comme un véhicule électrique (avec éventuellement une recharge de la batterie la nuit) et peut aussi être utilisé pour de longs trajets sans la limitation d'autonomie de la batterie. Après cette description des véhicules hybrides suivant trois critères, architecture, modes de fonctionnement et dimensionnement, regardons les catégories de véhicule hybride étudiées à la Direction de la Recherche de Renault [10].

Chapitre I : Véhicule hybride

Constructeur	Véhicule	Pile à combustible	Source secondaire d'énergie	Stockage de l'hydrogène	Auto-nomie	Motorisation
Honda /Honda/	FCX 	86 kW (Honda)	Super- -condensateurs	Réservoir haute pression (156,6 l, 350 bar)	430 km	80 kW
Toyota /Toyota/	Highlander FCHV* 	90 kW (Toyota)	Batteries Ni-MH	Version 3: Hydruure métallique Version 4: Réservoir haute pression Version 5: Reformeur	300 km 250 km -	80 kW
Nissan /Nissan/	X-Trail FCHV* 	90 kW (Nissan)	Batterie Li-ion	Réservoir haute pression (700 bar)	500 km	90 kW
General Motors /GM/	Zafira Hydrogen3 	94 kW	sans	Version liquide: Réservoir d'hydrogène liquide (68 l) Version gaz: Réservoir haute pression (77,4 l, 700 bar)	400 km 270 km	60 kW
Daimler-Chrysler /AFH2/	Class A F-Cell 	85 kW (Ballard)	Batteries Ni-MH	Réservoir haute pression (350 bar)	150 km	65 kW
PSA /PSA/	Partner Taxi-PAC 	5,5 kW	Batteries Ni-MH	Réservoir haute pression (300 bar)	250 km	22 kW
Michelin-PSI /Michelin/ /Büchi et al. 2007/	Hy-Light 	30 kW (PSI)	Super- -condensateurs	Réservoir d'hydrogène haute pression (200 bar) + Réservoir d'oxygène haute pression (350 bar)	500 km	2 moteurs-roues de 30 kW à l'avant.

* : Fuel Cell Hybrid Vehicle

Tab.I.2 : Exemples de véhicules à pile à combustible.

Chapitre I : Véhicule hybride

I.6. Le véhicule à pile à combustible chez les différents constructeurs [11]

Le choix généralisé de l'alimentation directe en hydrogène l'une des premières questions qui se pose pour les véhicules à pile à combustible est de savoir comment stocker l'hydrogène à bord. Si la molécule de H₂ est très énergétique (120 MJ/kg contre 43 MJ/kg pour l'essence), l'hydrogène est aussi le plus léger des éléments chimiques et occupe beaucoup plus de place qu'un autre gaz à poids égal. Par conséquent, pour produire autant d'énergie qu'avec 1 litre d'essence, il faut 4,6 litres d'hydrogène comprimé à plusieurs centaines de bars. La grande majorité des constructeurs engagés dans des recherches sur le véhicule à pile à combustible a néanmoins choisi de stocker l'hydrogène à bord du véhicule, sous forme liquide ou gazeuse, dans un réservoir adapté : c'est la voie dite de "l'hydrogène direct". Voici un rapide tour d'horizon des véhicules équipés de piles à combustible PEMFC proposés par ces constructeurs. Fer de lance de ce secteur aux États-Unis, l'armée américaine dispose du premier véhicule militaire à pile à combustible qui ne soit pas réservé à quelques usages très spécifiques, et qui pourrait être utilisé à très grande échelle puisque l'armée achète plusieurs dizaines de milliers de véhicules chaque année. Il s'agit d'un pick-up Chevrolet Silverado, qui embarque deux piles à combustible de 94 kW chacune, pour 250 ch, 3400 kg, et 200 km d'autonomie.



Fig. 1.7 : Véhicules de petite série Silverado et Equinox de Chevrolet

Chapitre I : Véhicule hybride

I.7 Conclusion :

Un véhicule hybride cumule deux sources d'énergie pour avancer, l'électricité et l'essence. Lorsqu'il démarre, c'est le moteur électrique qui se met en marche, il est alimenté par des batteries ou des supercondensateurs. Lors de fortes accélérations, ou au-delà d'une certaine vitesse, un autre moteur, à combustion thermique alimenté par de l'essence prend progressivement le relais, jusqu'à le surmonter complètement.

Dans ce premier chapitre nous avons rappelé la définition d'un véhicule hybride ainsi que quelques éléments de base des véhicules hybrides. Différents composants du véhicule hybride ont été présentés ainsi que les trois grandes familles d'architectures que l'on peut rencontrer : série, parallèle et combinée.

Le travail a été finaliser par l'énumération des véhicules hybrides utilisés par les différents constructeurs.

Chapitre II:

Généralité sur la pile à combustible

Chapitre II:

Généralité sur la pile à combustible

II.1 INTRODUCTION

La croissance de la consommation énergétique accompagnée d'une augmentation de la concentration des gaz à effet de serre dans l'atmosphère ainsi que l'épuisement inéluctable des ressources fossiles attendues vers la fin de ce siècle sont à la base de l'orientation vers une source ou méthode de production d'énergie renouvelable et écologique (énergie solaire, énergie hydraulique, éolienne, géothermie...). Dans cet intérêt, l'application des piles à combustible s'étend sur plusieurs domaines stationnaires, portables et mobiles. Dans cette dernière catégorie, la pile à combustible est généralement associée à un élément de stockage de l'énergie électrique pour alimenter un moteur électrique dans une structure dite 'hybride' [2].

II.2 LA PILE À COMBUSTIBLE

II.2.1 HISTORIQUE

La pile à combustible (PAC) convertit de l'énergie chimique en énergie électrique. Sa technologie est devenue de plus en plus familière aux cours des dernières décennies mais a pourtant été découverte il y a plus de 150 ans. En 1839, Sir William Grove, un juriste anglais et chercheur amateur en chimie, décrit une expérience où de l'eau et de l'électricité sont produites à partir d'oxygène et d'hydrogène. L'expérience de Grove donne naissance à la batterie à gaz (Fig.II.1), rebaptisée plus tard pile à combustible /Fuel Cell Today/ /SAE/.

Chapitre II : Généralité sur la pile à combustible

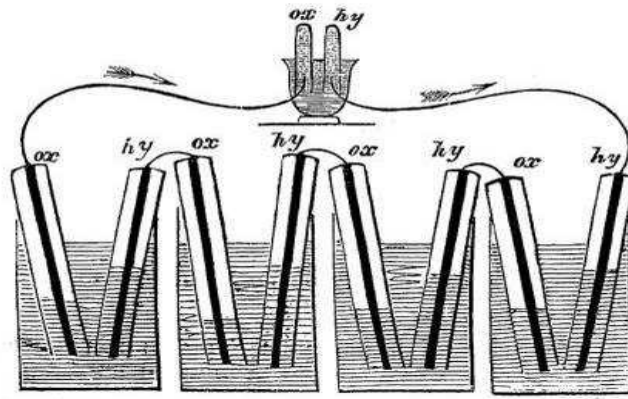


Fig. II.1 : L'expérience de Sir William Grove /ClubPac/.

La découverte de W. Grove ne fut cependant pas exploitée et fut reléguée au rang de curiosité scientifique, alors que l'extraction des combustibles fossiles et le développement du moteur thermique étaient en plein essor. En 1932, le docteur Francis Bacon reprend les recherches initiées par W. Grove et parvient à réaliser une pile à combustible de 5kW en 1959.

La pile à combustible a connu son émergence grâce à la NASA (National Aeronautics and Space Administration, USA) qui cherchait un moyen de produire de l'électricité à bord de ses engins spatiaux. La pile à combustible apparut comme un système idéal du fait de la présence d'oxygène et d'hydrogène disponible dans les systèmes de propulsion. Des piles à combustible furent utilisées avec succès par la capsule Gemini en 1964 /Burke 2003/, et l'eau produite par la réaction entre l'hydrogène et l'oxygène était consommée par les astronautes. Il s'agit d'une des premières utilisations concrètes des piles à combustible. L'intérêt de l'utilisation de la pile à combustible dans le domaine des transports remonte à 1973. La première crise pétrolière a conduit les gouvernements, les industries et les laboratoires à chercher une alternative aux énergies fossiles pour tenter de s'assurer une indépendance énergétique. De nombreux efforts et moyens ont été fournis pour réduire les coûts de fabrication des systèmes pile à combustible, pour augmenter leur fiabilité et pour améliorer leur compacité. En 1993 un bus à pile à combustible est réalisé par l'entreprise

Ballard (aujourd'hui l'un des leaders mondiaux dans le domaine de la pile à combustible) en partenariat avec le constructeur automobile Daimler-Benz /Prater 1992/. La pile à combustible était de type PEM (« Proton Exchange Membrane » ou « membrane échangeuse de proton »). L'hydrogène nécessaire à l'alimentation de la pile était produit par le reformage embarqué de méthanol. Depuis les années 1990, les piles à combustibles et l'hydrogène sont considérés comme des candidats possibles à la production d'énergie durable et propre, que ce soit pour des applications mobiles ou stationnaires. Parmi les différents types de pile à combustible, la pile de type PEM (« Proton Exchange Membrane », également appelée PEFC (« Polymer

Chapitre II : Généralité sur la pile à combustible

Electrolyte Fuel Cell »), est la technologie généralement retenue pour l'usage automobile. Plusieurs raisons expliquent ce choix /Lachaize 2004/ /Emadi et al. 2005/ /Boettner et al. 2002/ :

✓ Densité de puissance :

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

✓ Température de fonctionnement :

La pile de type PEM a une température de fonctionnement comprise entre 50 °C et 80 °C, ce qui est adapté à un usage automobile.

✓ Structure solide :

La pile à combustible PEM est composée d'éléments solides (spécialement la membrane en polymère). Cette structure solide garantit une certaine résistance mécanique vis à vis des contraintes liées à l'environnement automobile [12].

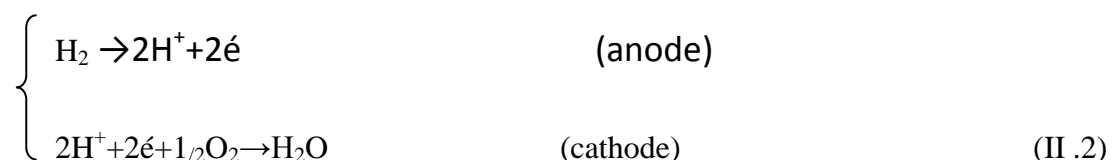
II.3 LA PILE À COMBUSTIBLE À MEMBRANE POLYMÈRE (TYPE PEM)

II.3.1 Principe de fonctionnement [9,13]

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. 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 :



Chapitre II : Généralité sur la pile à combustible

Ces réactions d'oxydation de l'hydrogène (à l'anode) et de réduction de l'oxygène (à la cathode) s'effectuent à l'interface électrolyte\ électrode en présence d'un catalyseur (platine), en des points appelés « points triples » (Fig. II.2)

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

- 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^- .
- Une structure poreuse capable d'assurer la diffusion de l'hydrogène ou de l'oxygène moléculaire.
- Une structure 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.

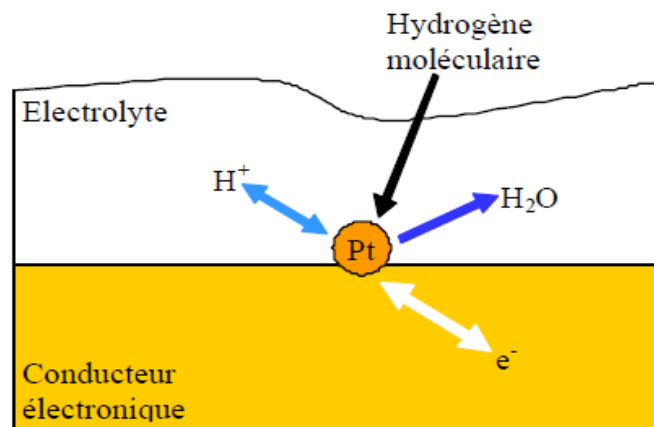


Fig .II.2 : Principe de la réaction catalytique dans l'électrode volumique.

Le principe de fonctionnement de la pile à combustible peut être résumé par le schéma suivant :

Chapitre II : Généralité sur la pile à combustible

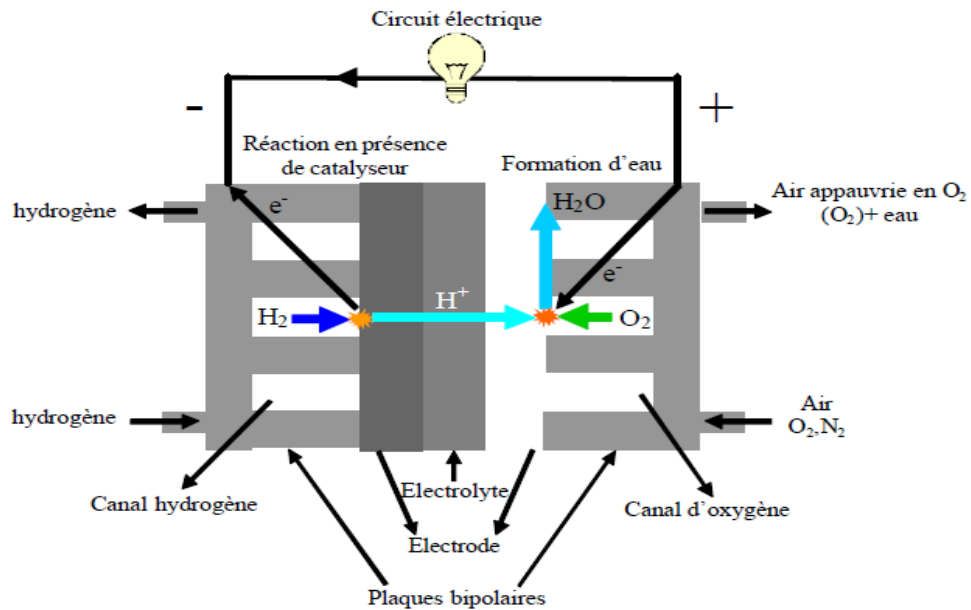


Fig. II.3 : schéma de principe d'une pile a combustible PEMFC [14].

Les électrolytes peuvent être liquides ou solides, certains fonctionnent à haute température, d'autres à basse température tendent à exiger des catalyseurs en métal noble, typiquement du platine, destiné à améliorer les réactions aux électrodes.

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.

II.3.2 Les différents types de piles à combustible [15,16]

Il existe actuellement cinq technologies de piles à combustible classées selon la nature de leur électrolyte dont résulte leur température de fonctionnement, basse (<150°), moyenne (200°C), haute (650°C-1000°C). [16]

- 1) Pile à membrane polymère échangeuse de protons, Proton Exchange Membrane Fuel Cell : PEMFC
- 2) Pile à acide phosphorique, Phosphoric Acid Fuel Cell : PAFC.
- 3) Pile à oxyde solide, Solid Oxide Fuel Cell : SOFC.
- 4) Pile à carbonate fondu, Molten Carbonate Fuel Cell : MCFC.
- 5) Pile alcaline, Alkaline Fuel Cell : AFC.

Chapitre II : Généralité sur la pile à combustible

6) Pile alimentée directement par méthanol, Direct Methanol Fuel Cell :DMFC .

	AFC	PAFC	PEMFC	DMFC	MCFC	SOFC
	Basse température				Haute température	
Température	50à250°C	150à220°C	70à100°C→ 200°C	70-90°C	600à800°C	700à1050°C
Electrolyte	Potasse(KOH) liquide	Acide phosphorique liquide	Membrane en Polymère solide	Membrane en polymère solide	Sel de Carbonate fondu liquide	Céramique Solide
Combustibles Possibles	Hydrogène	Hydrogène Gaz naturel (reformage)	Hydrogène	Méthanol	Hydrogène, Gaz naturel, Méthanol...	Hydrogène, Gaz naturel, Méthanol,...
Gamme de Puissance	1W à 100KW	200 KW à 100 MW	1W à10MW	1W à Plusieurs KW	500 KW à10 MW	1 KW à 100 MW
Rendement Electrique	55-60%	35-45% +75% en cogénération	30-45%		50-60%	50-55% 70% en cogénération
Applications	Spatial Défense, Equipements portables	Stationnaire, Cogénération transport	Spatial transport, Stationnaire, Equipement portable	Transport, Equipements portable	Stationnaire, Transport, Cogénéra- tion, production décentralisé	Stationnaire, cogénération
Principaux Constructeurs	ZEVCO IFC	IFC(ONSI) FUJI SIEMENS	BALLARD NUEVERA H-POWER AXANE* HELION* (*constructeurs Français)	SIEMENS HITACHI SMART FUEL CELL	MC- POWER ERC	SIEMENS WESTIGH- OUSE SULZER
Etat du marché	Commercial- isée	commercialisée	Commerciali- sée R&D	Commercia- lisée R&D	R&D	R&D exrémentale

Tab. II.1 : Différents types de piles à combustible

La figure (Fig.II.4) présente les réactions à l'anode et à la cathode. Les PAC sont groupées en fonction du type d'ion qui assure le transfère de charge.

Chapitre II : Généralité sur la pile à combustible

Systèmes	Anode	Electrolyte	Cathode	Température
AFC	$H_2 + 2(OH)^- \rightarrow 2H_2O + 2e^-$	$\leftarrow OH^- \leftarrow$	$\frac{1}{2} O_2 + H_2O + 2e^- \rightarrow 2(OH)^-$	60-80 °C
PEMFC PAFC DMFC	$H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$	$\rightarrow H^+ \rightarrow$	$\frac{1}{2} O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O$	60-220 °C
MCFC	$H_2 + CO_3^{2-} \rightarrow H_2O + CO_2 + 2e^-$ $CO + CO_3^{2-} \rightarrow 2CO_2 + 2e^-$	$\leftarrow CO_3^{2-} \leftarrow$	$\frac{1}{2} O_2 + CO_2 + 2e^- \rightarrow CO_3^{2-}$	600-660 °C
ITSOFC SOFC	$H_2 + O^{2-} \rightarrow H_2O + 2e^-$ $CO + O^{2-} \rightarrow CO_2 + 2e^-$ $CH_4 + 4O^{2-} \rightarrow 2H_2O + CO_2 + 8e^-$	$\leftarrow O^{2-} \leftarrow$	$\frac{1}{2} O_2 + 2e^- \rightarrow O^{2-}$	600-1000 °C

Fig.II.4 : schéma du principe de fonctionnement d'une pile [17].

II.4 Hydrogène [18]

L'hydrogène (H) est l'élément le plus abondant dans l'univers. 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. La plupart de l'énergie que nous utilisons aujourd'hui 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 manières 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.

Chapitre II : Généralité sur la pile à combustible

II.5 Construction de pile à combustible de type PEM

II.5.1 L'alimentation des piles en combustible

Les piles fonctionnent essentiellement par l'hydrogène comme combustible, ou dans certains cas avec un mélange hydrogène monoxyde de carbone. L'intégration d'une unité de reformage dans le système, permettrait l'utilisation d'autres combustibles, tels que le gaz naturel et des hydrocarbures légers. L'unité de reformage permet de produire un gaz riche en hydrogène à partir d'un composé hydrocarboné (méthanol, éthanol, méthane, essence ...) et d'air et/ou d'eau. On distingue deux systèmes de production de l'hydrogène au sein d'une pile, soit le reformage interne pour les piles fonctionnant à haute température, MCFC et SOFC, soit le reformage externe pour les piles fonctionnant à des basses et moyennes températures, PEMFC et PAFC [17].

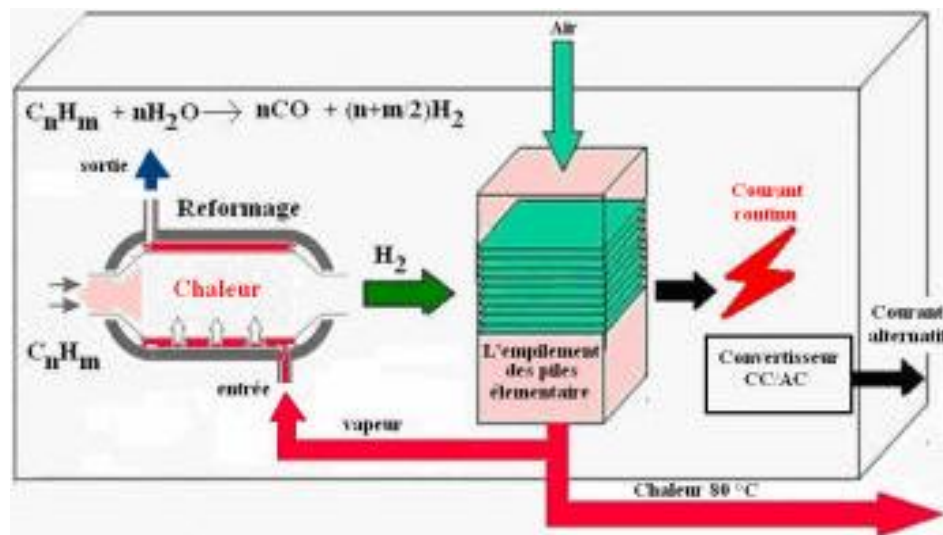


Fig.II.5: Schéma des PAC fonctionnant à haute température et à reformage interne de l'hydrogène [17].

II.6.SYSTEME PILE A COMBUSTIBLE EMBARQUE :

Le système ou générateur PàC se compose donc de la pile et de composants auxiliaires destinés à la faire fonctionner. La figure ci-dessous fait apparaître un exemple de schéma relatif à un système PàC embarqué.

Chapitre II : Généralité sur la pile à combustible

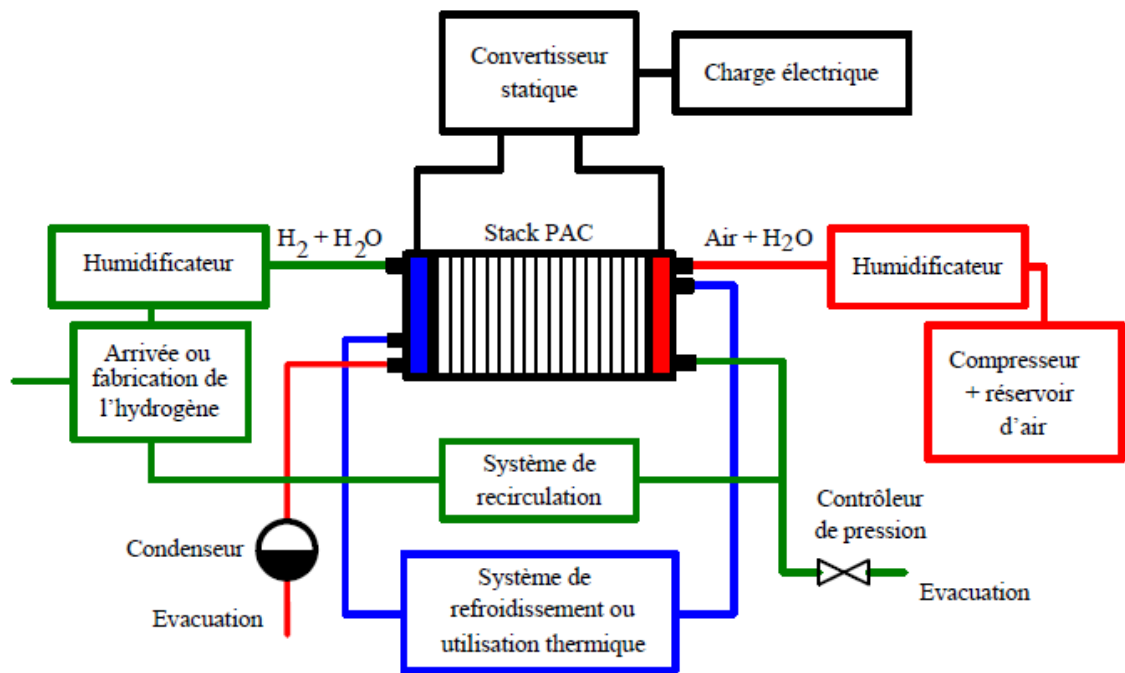


Fig.II.6 : Schéma illustrant les différents éléments d'un système PàC (source : [19])

Les auxiliaires assurent notamment l'approvisionnement des réactifs, leur conditionnement, l'évacuation des produits et de la chaleur, la conversion et l'exploitation de l'énergie électrique. Il est ainsi possible de décomposer le système PàC en plusieurs sous-systèmes assurant ces fonctions de base au sein d'un véhicule.

- **Le conditionnement entrée-sortie cathode**

La PàC peut être alimentée soit directement en oxygène pur stocké sous pression dans un réservoir [Die05], soit en air. Dans ce cas, l'air est fourni au moyen d'un compresseur ou d'une soufflante. Le choix de la pression de fonctionnement a une influence sur le rendement de la conversion électrochimique, sur le procédé d'humidification des réactifs et sur la consommation en énergie du compresseur. Un fonctionnement à haute pression permet d'obtenir de plus fortes densités de puissance pour la pile ; il facilite aussi la gestion hydrique et thermique. L'utilisation d'une turbine de détente en sortie cathode peut éventuellement permettre de récupérer une partie de l'énergie de compression. Un fonctionnement à basse pression conduit au niveau de la pile à un rendement en tension moins bon et oblige à augmenter la capacité de l'ensemble humidification / condensation. Par contre, à basse pression, la consommation du compresseur est réduite. L'air sort de la cathode généralement saturé d'humidité et en présence d'un flux d'eau liquide [12].

Chapitre II : Généralité sur la pile à combustible

- **Le conditionnement entrée-sortie anode**

Le combustible utilisé au sein de la pile PEM est l'hydrogène. Il peut être stocké dans un réservoir ou bien produit à partir d'un hydrocarbure, généralement du méthanol, au moyen d'un reformeur. Une alimentation en hydrogène pur permet l'optimisation de la quantité d'énergie embarquée : il est ainsi possible de faire réagir au moins 90 % de l'hydrogène embarqué, l'hydrogène non consommé correspondant à des purges. Le circuit hydrogène peut intégrer une boucle de re-circulation (avec pompe). Des humidificateurs et condenseurs peuvent aussi être mis en oeuvre.

- **Le refroidissement et l'humidification**

Dans un générateur PàC, les sources de chaleur sont nombreuses : pertes thermiques de la réaction électrochimique, échauffement de l'air lors du travail de compression, échauffement des organes électriques tels que les moteurs de pompes et les convertisseurs, chaleur libérée par les réactions exothermiques liées au processus de reformage. A contrario, des apports de chaleur sont nécessaires à l'humidification des gaz, aux réactions endothermiques dans le cas du reformage (vapo-reformage). Dans une pile PEM, il n'est guère envisageable d'effectuer des échanges de chaleur entre les sources et les puits de chaleur : ainsi, la chaleur due à la réaction dans la pile, maintenue à une température souvent inférieure à 80 °C environ, ne permet-elle pas d'humidifier les réactifs. Le circuit de refroidissement d'un système PàC destiné à une application automobile est souvent complexe ; il peut être scindé en plusieurs circuits. La stratégie de refroidissement des stacks est beaucoup discutée et aucune solution universelle n'a encore été trouvée. Bien que la PàC soit un générateur à haut rendement, l'énergie thermique à évacuer n'est pas négligeable. La contribution des flux des gaz à l'évacuation de la chaleur étant très faible, un système de refroidissement doit dans la plupart des cas être intégré au stack. Le problème du refroidissement de la pile peut cependant être envisagé en fonction du niveau de puissance. Pour des piles dont la puissance maximale est environ 1 kW, un refroidissement par air (convection) peut être effectué. Pour des piles dont la puissance est supérieure à 1 kW, le refroidissement est généralement réalisé par un fluide. Nous avons vu qu'il était impératif de préserver la charge en eau dans la membrane de la pile. Il convient donc souvent d'humidifier les gaz avant leur entrée dans le stack.

- **La conversion et l'exploitation de l'énergie électrique**

L'énergie électrique issue du stack doit en général être conditionnée (adaptation de la tension à l'aide d'un convertisseur électronique élévateur) de manière à pouvoir être utilisée au niveau du groupe moto-propulseur. De plus, la supervision du système PàC doit être assurée par des dispositifs de contrôle électroniques.

Chapitre II : Généralité sur la pile à combustible

Tous les auxiliaires, s'ils sont indispensables au fonctionnement de la pile, n'en sont pas moins des consommateurs d'énergie parasitant directement la production de la pile. Ces organes peuvent représenter jusqu'à 60% en masse et en volume du système et une dépense énergétique de l'ordre de 20% [12].

II.7. APPLICATIONS DES PILES A COMBUSTIBLE [12]

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

II.7.1. Applications portables

Celles-ci incluent le téléphone mobile d'une puissance moyenne de l'ordre de 400 mW et l'ordinateur portable d'une puissance moyenne de 10 W. Ces applications connaissent une très forte croissance et les recherches les plus importantes sont axées sur l'utilisation d'une pile à combustible chargeant une petite batterie qui assure mieux l'apport d'énergie lors des pics d'émission. L'autonomie n'est alors limitée que par la taille du réservoir d'hydrogène ou de méthanol. L'utilisateur recharge son portable comme on recharge un briquet ou un stylo à encre, en quelques secondes et chaque recharge donne 3 à 5 fois plus d'autonomie qu'une batterie actuelle, pour le même encombrement. La technologie qui est utilisée est la pile PEM du fait de sa basse température de fonctionnement et de sa technologie tout solide alimentée soit directement en hydrogène, soit avec du méthanol. En terme de coût, la référence est celle de la meilleure batterie actuelle soit environ 0,80 €/Wh [12].

II.7.2 Applications stationnaires

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

Chapitre II : Généralité sur la pile à combustible

(chauffage et eau chaude). Ils sont alimentés par des combustibles classiques : un reformeur transforme le combustible hydrocarbure (généralement du gaz naturel) en hydrogène. Ce sera probablement le premier marché de masse à être occupé par la technologie pile à combustible.

II.7.3 Applications embarquées :

Le transport est le domaine d'application à l'origine du développement de la pile à combustible vers le début des années 90. Compte tenu de la contrainte de coût, particulièrement forte dans ce secteur, et de la concurrence de la technologie traditionnelle (moteur thermique), il faut distinguer deux sous-familles assez différentes suivant qu'il s'agit d'équiper un véhicule léger ou un véhicule lourd. Il est demandé au véhicule léger quelque 3000 h de fonctionnement pour une dizaine d'années de durée de vie alors qu'un véhicule lourd (transport de passagers ou marchandises) exige une durée de fonctionnement bien plus importante [12].

II.7.3.1 Véhicules légers

Tous les constructeurs américains, japonais ou européens ont déjà sorti des prototypes et prévoient des pré-séries dont l'échéance a tendance à reculer d'une année tous les ans. Les constructeurs vendront probablement à perte pour ouvrir le marché et acquérir de l'expérience. La technologie ne devrait devenir financièrement rentable qu'à partir de 2010 voire 2020. A l'horizon de 2030, ce sera le marché mondial qui sera visé avec une production annuelle qui pourrait atteindre 10 à 20 % du marché. La technologie utilisée dans ces applications sera essentiellement de type PEMFC, même si quelques expériences utilisent l'AFC ou la PAFC. Le coût objectif de cette filière est d'environ 130 €/kW pour l'ensemble de la chaîne de traction dont un tiers pour la pile seule [12].

II.7.3.2. Véhicules lourds

Plusieurs prototypes de bus ont été construits à partir de 1993. La compagnie canadienne Ballard Power Systems a fait office de pionnier avec 6 autobus (pile PEM), qui ont aujourd'hui achevé leurs tests en service régulier à Vancouver et à Chicago. La compagnie allemande Daimler-Chrysler, sur la base de la même technologie que Ballard a annoncé le lancement d'une pré-série de 30 bus, en vue d'une mise en service dans plusieurs villes européennes. Compte tenu de la durée de vie attendue pour ce type de véhicule, les systèmes développés se rapprochent des systèmes stationnaires. A côté de ces applications routières,

Chapitre II : Généralité sur la pile à combustible

certaines constructeurs pensent à un tramway propre et sans caténaire, utilisant une pile à combustible. Il faut enfin noter un intérêt croissant de constructeurs de navires pour la pile SOFC, au niveau du MW ou plus, essentiellement comme source d'appoint ou de secours.

II.8 Les rendements de fonctionnement des PAC [17]

En comparaison avec les moteurs à combustion interne et les autres systèmes de production de puissance (turbine à gaze, etc.), les piles à combustible ont un rendement énergétique très élevé. La figure 4 présente une comparaison des performances des différents systèmes de production de puissance.

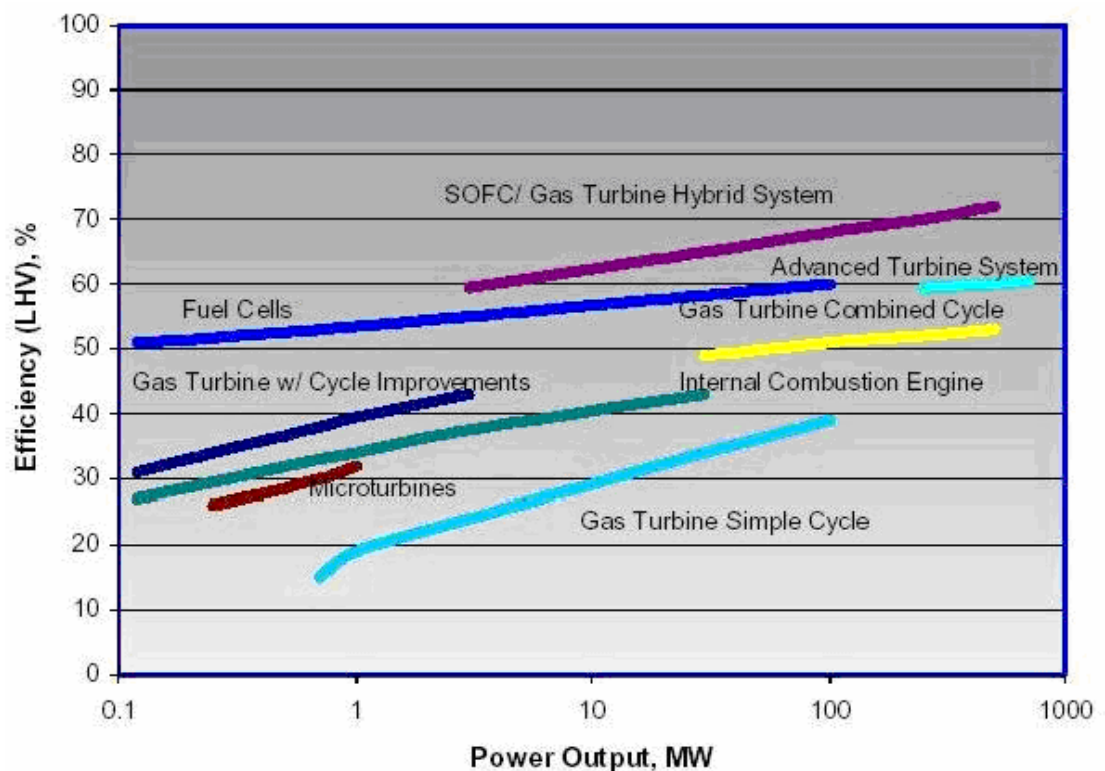


Fig. II.7 : Comparaison de la performance des PAC à la performance d'autre système de production de puissance (Fuel Cell Handbook, 2000)

Les PAC (Fuels Cells dans la figure) en général et les piles à électrolyte solide (SOFC) en particulier, couvrent tous les domaines de production de puissance présentés dans la figure 4, de moins d'un MW à des centaines de MW. Leurs rendements en électricité varient de 50% à 60% et dépassent 70% pour les SOFC lorsque ce type de piles fonctionne en cycle combiné.

Chapitre II : Généralité sur la pile à combustible

II.9 MODELE ELECTROCHIMIQUE DE LA PILE A COMBUSTIBLE PEMFC :

Les modèles mathématiques offrent un outil notable et indispensable pour approuver la conception et la performance des piles à combustible. Deux approches principales de modélisation se présentent dans la littérature. La première approche inclut les modèles structuraux, qui visent à simuler le transfert de chaleur, le transport de masse et les phénomènes électrochimiques produits dans les piles à combustible. Certains de ces modèles se concentrent sur la modélisation des éléments spécifiques de comportement de la pile, telle que l'anode, la cathode et la membrane, alors que d'autres visent à présenter une simulation complète de la pile à combustible. Tous ces modèles prévoient d'expliquer les processus fondamentaux se produisant dans les systèmes de piles à combustible et en conséquence servir d'outil pour la conception et l'optimisation des différents composants de cellules. La deuxième approche inclut les modèles basés sur les équations empiriques ou semi empiriques, appliqués afin de prévoir l'effet de différents paramètres opératoires sur les caractéristiques courant-tension de la pile à combustible, sans examiner en détail les phénomènes physiques et électrochimiques impliqués dans l'opération. Amphlett *et al.* ont présenté un modèle phénoménologique en développement depuis l'année 1994.

Dans notre travail, nous avons utilisé des piles à combustible PEMFC, le modèle électrochimique (Amphlett *et al.*) le plus utilisé dans la littérature qui décrit la courbe de tension d'une pile PEMFC et prévoit ces polarisations. Ainsi le modèle de Larminie et Dick.

II.9.1 Le modèle statique de Larminie and Dick [15, 20]

De nombreux travaux comme par exemple [6], [18] et [21] proposent un modèle statique décrivant la courbe de polarisation de la pile PEM figure(2) 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) :

$$V_{FC} = E - V_{act} - V_{ohm} - V_{conc} \dots \dots \dots (II.3)$$

Chapitre II : Généralité sur la pile à combustible

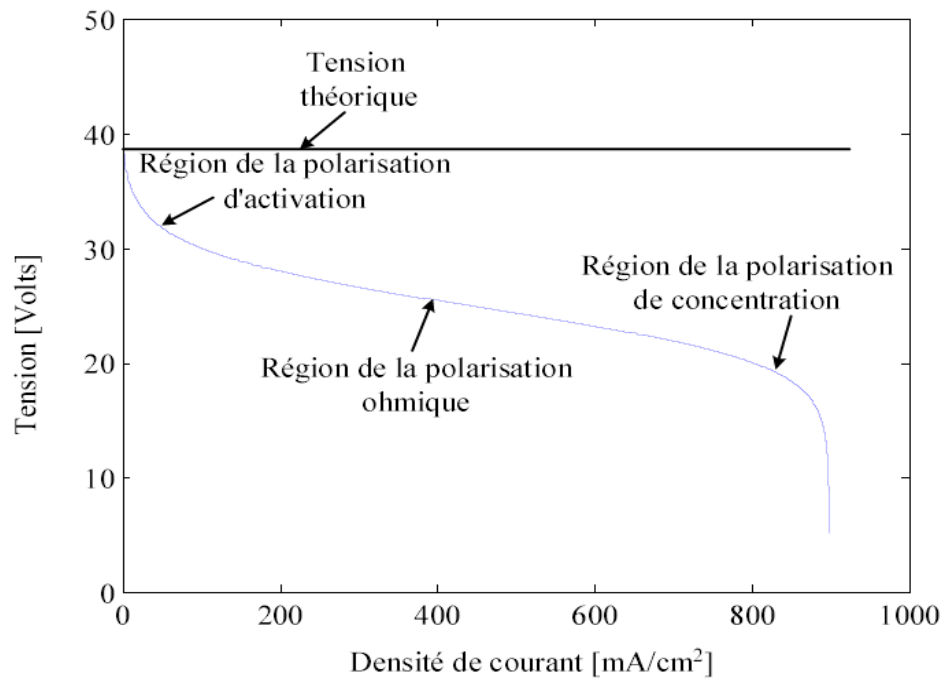


Fig.II.8 : Caractéristique Tension-courant d'une pile PEM [22].

II.9.1.1 Pertes d'activation

Les pertes 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'oxygène et 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 :

$$V_{act} = A * \ln\left(\frac{I_{FC} + i_n}{i_o}\right) \dots\dots\dots (II.4)$$

Ou :

I_{FC} : est le courant délivré par la pile à combustible,

i_o : Le courant d'échange caractérisant à vide les échanges électrode-électrolyte.

Chapitre II : Généralité sur la pile à combustible

i_n : Le courant interne permettant de tenir compte d'une éventuelle traversée de gaz et/ou d'électrons à travers l'électrolyte

A : La pente de la droite de travail

II.9.1.2 Pertes ohmique

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

$$V_{ohm} = R_m (I_{FC} + I_n) \dots\dots\dots (II.5)$$

Où R_m est la résistance totale de la pile à combustible.

II.9.1.3 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 délivrée 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 zéros, et d'une constante B appelée constante de transport ou de transfert de masse :

$$V_{conc} = -B \ln \left(1 - \frac{I_{FC} + i_n}{i_L} \right) \dots\dots\dots (II.6)$$

II.9.1.4 Les paramètres de la pile

- $E = 27.1V$ (à 55 °C)
- $i_o = 6.54 \text{ mA}$
- $A = 1.35 \text{ V}$
- $B = 1.29 \text{ V}$
- $R_m = 0.045 \Omega$
- $i_n = 230 \text{ mA}, i_L = 100 \text{ A}$

Chapitre II : Généralité sur la pile à combustible

II.9.2 Le schéma de simulation :

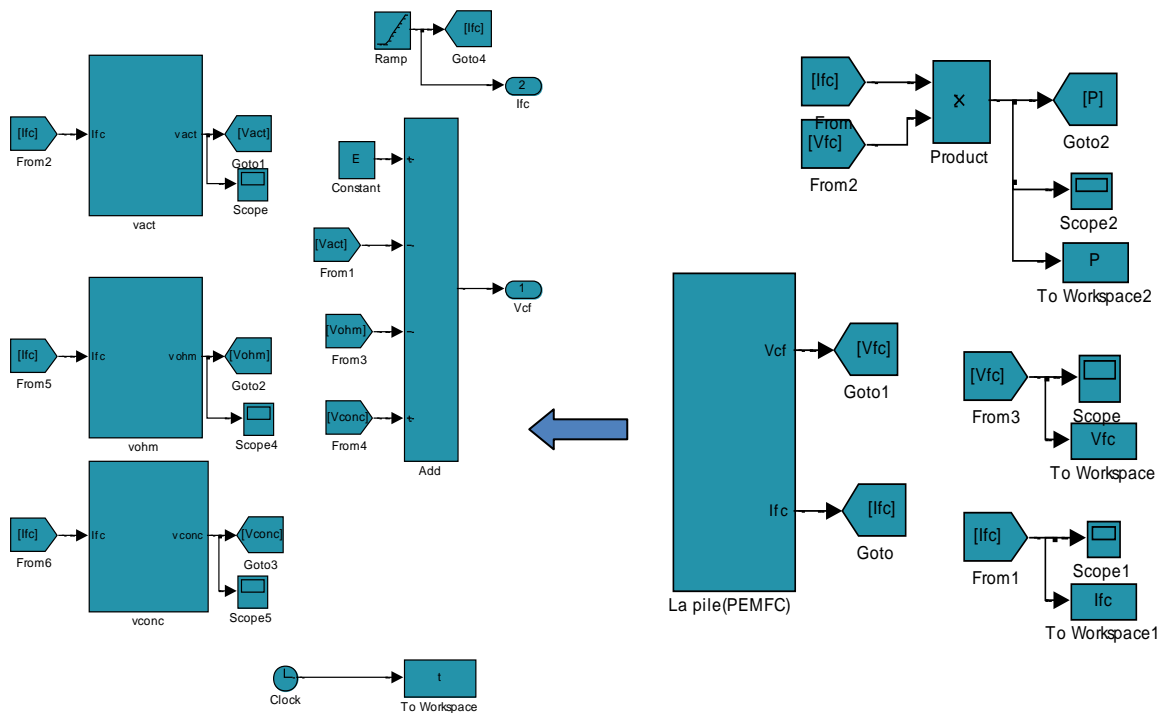


Fig II.9. Le schéma de la simulation au MATLAB.

II.9.3 Les résultats du la simulation

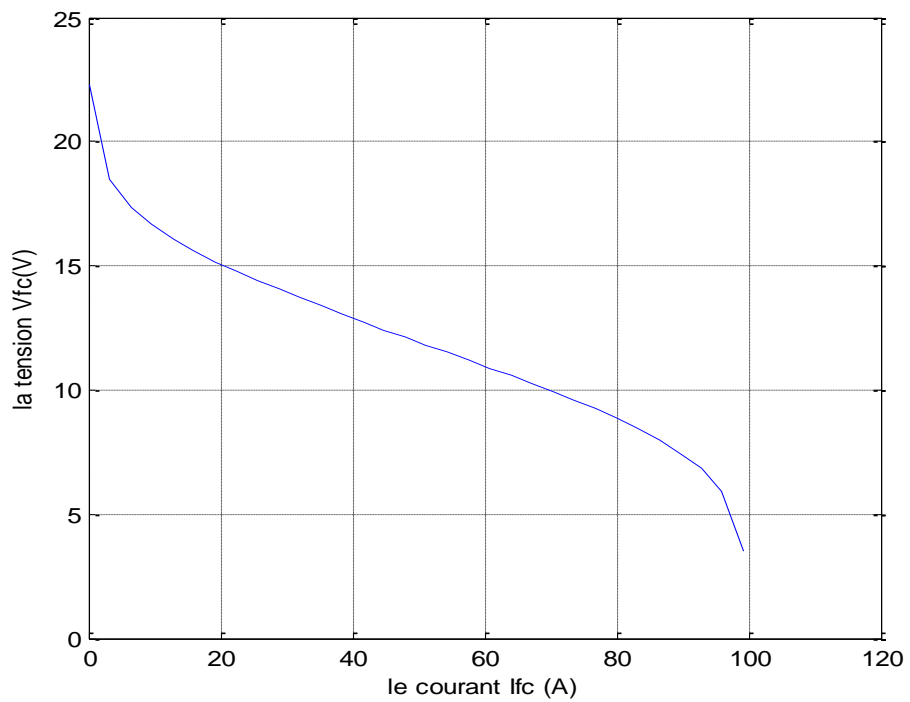


Fig.II.10.Caractéristique statique de la pile PEM 500 W du GREEN

Chapitre II : Généralité sur la pile à combustible

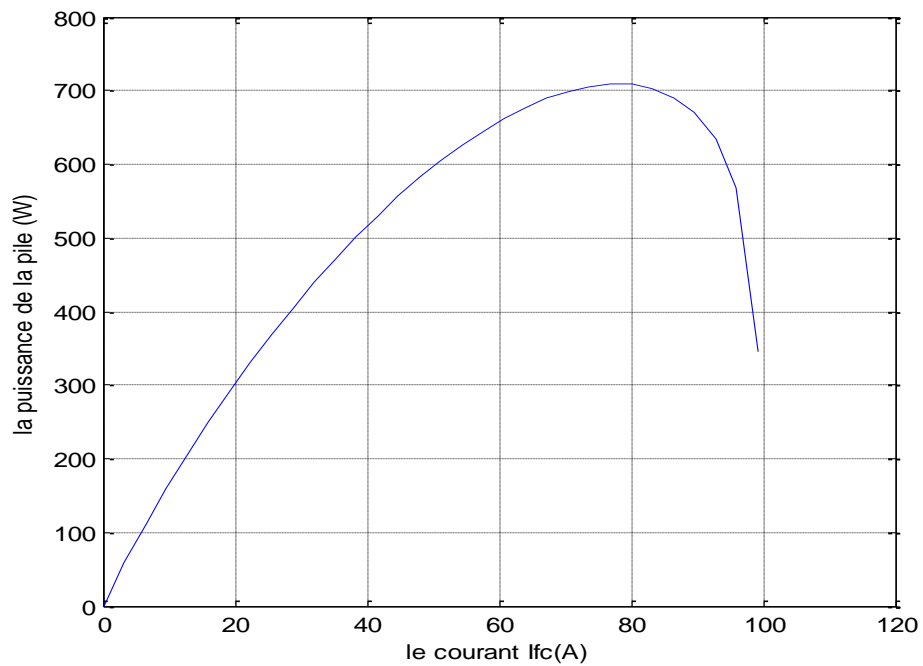


Fig.II.11.la puissance de la pile PEM 500 W du GREEN

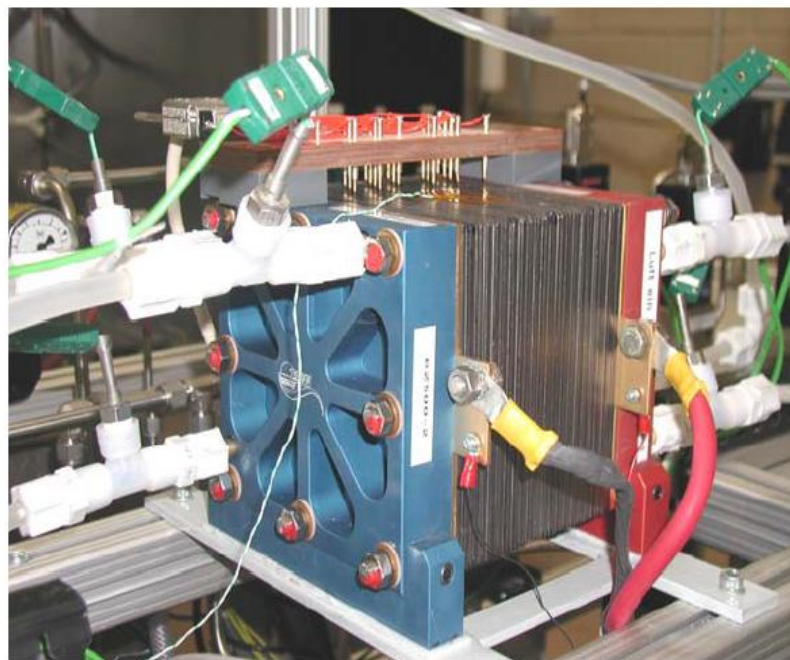


Fig. II.12: Photographie d'une pile à combustible PEM du constructeur ZSW (20 cellules ; puissance nominale de 500W) sur le banc d'essais 1kW de la plateforme de Belfort

Chapitre II : Généralité sur la pile à combustible

II.10 Avantages et inconvénients des piles à combustible de type PEM [3]

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.

II.10.1 Avantages des piles à combustible de type PEM

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.

II.10.2 Inconvénients des piles à combustible de type PEM

Elles présentent aussi quelques 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.

Chapitre II : Généralité sur la pile à combustible

II.11 Conclusion

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

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

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

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

Chapitre III:

Généralités sur les supercondensateurs

Chapitre III: Généralités sur les supercondensateurs

III.1 Introduction [23]

La recherche s'est accentuée ces dernières années sur les moyens énergétiques pour remplacer les énergies fossiles par des énergies renouvelables comme l'énergie éolienne, l'énergie solaire, la pile à combustible.... La complexité de l'intégration de ces alternatives réside dans leurs applications aux systèmes embarqués comme pour le cas des véhicules hybrides et véhicule pile à combustible. En effet, le problème est que ces sources d'énergie sont limitées en puissance. Les récents développements dans le domaine électrochimique ont donné naissance à un nouvel élément de stockage de l'énergie électrique ; le supercondensateur qui s'avère une des solutions à ce type de problème. Il est placé entre les batteries et les condensateurs classiques aux niveaux puissance et énergie. Sa capacité peut atteindre des valeurs très élevées (jusqu'à 5000F) avec une tension maximale de charge jusqu'à 2,7V. Pour sa forte puissance, il se montre aujourd'hui comme une bonne alternative permettant une amélioration de la puissance des systèmes. Par exemple, il peut être introduit en parallèle avec la pile à combustible et ainsi répondre aux demandes de fortes puissances en régime transitoire (accélération, récupération de l'énergie de freinage). Une bonne gestion de l'énergie disponible permet d'optimiser la consommation énergétique des systèmes et ainsi d'améliorer le rendement. Pour assurer le bon fonctionnement de ces éléments, une caractérisation des supercondensateurs en fonction des contraintes auxquels seront soumis est obligatoire. Ces contraintes sont : la température du milieu, la fréquence d'utilisation et la tension de charge.

III.2 Principe de fonctionnement

En 1853, le physicien Hermann Von Helmholtz observa, suite à l'application d'une différence de potentiel entre deux électrodes plongées dans un électrolyte, que le phénomène de décomposition de l'électrolyte faisait apparaître un seuil de tension en dessous duquel le comportement du système était principalement capacitif. Ce faisant Helmholtz découvrait le principe de base des supercondensateurs, à savoir les propriétés capacitives de l'interface entre un conducteur électronique solide et un conducteur ionique liquide.

Chapitre III : Généralités sur les supercondensateurs

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, et dans laquelle règne un champ électrique, relativement intense, de l'ordre de $10 \text{ kV} \cdot \mu \text{ m}^{-1}$. Un supercondensateur peut donc être schématisé, comme figure III.1, par deux capacités représentatives des charges stockées, et connectées en série par le biais d'une résistance associée à l'électrolyte.

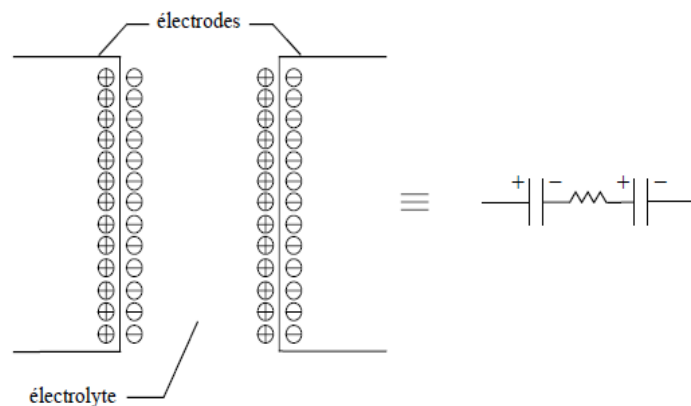


Fig.III.1 Principe de la couche double électrique

Les supercondensateurs sont donc, pour la plupart des dispositifs commercialisés (en l'occurrence ceux qui nous intéressent ici, c'est-à-dire ceux dits à couche double électrique), des capacités à part entière. Le stockage d'énergie est, de fait, d'origine électrostatique, et non pas électrochimique comme dans le cas des accumulateurs, ce qui leur confère une puissance spécifique potentiellement élevée, typiquement d'un seul ordre de grandeur inférieure à celle des condensateurs électrolytiques classiques.

Leur différence fondamentale avec ces derniers réside dans l'absence apparente de couche diélectrique, la fonction diélectrique du dispositif étant assurée par les molécules du solvant. Il en résulte des capacités surfaciques élevées, comprises entre $10 \mu\text{F} \cdot \text{cm}^{-2}$ et $30 \mu\text{F} \cdot \text{cm}^{-2}$, et en revanche une tenue en tension modeste, limitée par la décomposition du solvant, de l'ordre de 2.5 V nominal pour un solvant organique [24].

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,

Chapitre III : Généralités sur les supercondensateurs

comme le charbon actif qui présente des surfaces spécifiques supérieures à $1000 \text{ m}^2.\text{g}^{-1}$ (Fig. III.2).

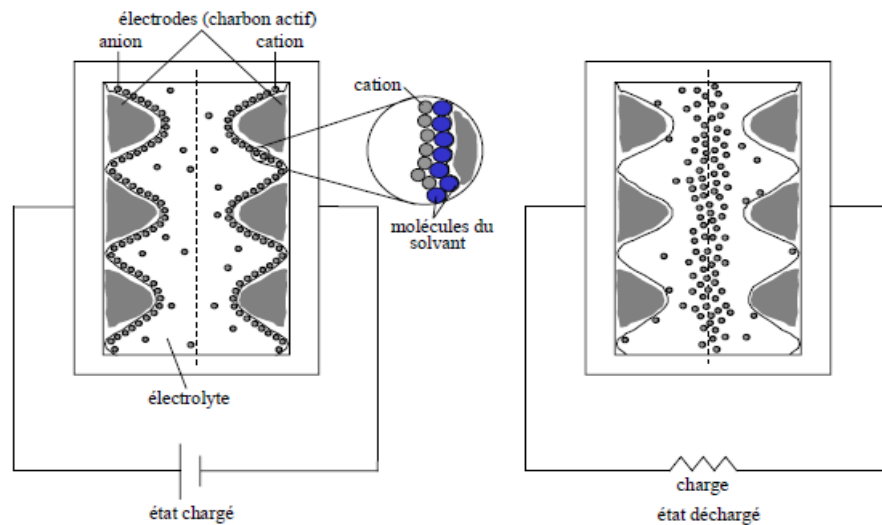


Fig. III.2 : Structure interne des supercondensateurs à couche double électrique

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 Wh.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, ...) [25].

III.3 Applications courantes des supercondensateurs

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

Deux exemples d'applications couramment envisagées sont :

- De permettre le démarrage fréquent des moteurs thermiques par des supercondensateurs, en remplacement des batteries (systèmes Stop & Start...).

Chapitre III : Généralités sur les supercondensateurs

- La traction électrique autonome entre deux stations du transport urbain, basée sur le principe du biberonnage en station pendant l'arrêt.

III.4 Type de stockeur d'énergie

III.4.1 Stockeur d'énergie fixe [26]

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

Les supercondensateurs BCAP0010 de Maxwell, qui sont utilisés dans le système "SITRAS[®] SES", sont caractérisés par une capacité de 2600 Farads, une résistance interne de 0.4 mOhm et une tension d'utilisation de 2.5 Volts. Le stockeur d'énergie de 64 Farads, composé de 1300 BCAP0010, est conçu pour une tension nominale de 750 Vdc. Avec la cabine, le convertisseur et l'électronique de contrôle, le système occupe un volume de 2.8 m x 2.9 m x 2.8 m et pèse 5.5 tonnes. Il fournit une puissance maximale de 1 mégawatt dans un rayon de 3 km. La batterie de supercondensateurs permet de réduire en moyenne la puissance consommée de 50 kW.



Fig. III.3 : Pack de supercondensateurs dédié à la récupération de l'énergie lors du freinage

Chapitre III : Généralités sur les supercondensateurs

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

III.4.2 Stockeur d'énergie embarqué [26]

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

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

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



Fig.III.4 : Système MITRAC utilisant les supercondensateurs pour le stockage de l'énergie

Chapitre III : Généralités sur les supercondensateurs

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

III.5 Comparaison entre les batteries et les supercondensateurs

Le supercondensateur 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. III.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 supercondensateurs qui sont utilisés pour stocker l'énergie avec une constante de temps inférieure à quelques dizaines de secondes. Le tableau ci-dessous résume les performances des trois éléments de stockage présentés ci-dessus [27].

Chapitre III : Généralités sur les supercondensateurs

	Condensateur électrolytique	supercondensateurs	Batterie
Temps de charge t	$\mu s < t < ms$	$1s < t < 30s$	$1\text{heure} < t < 5\text{heures}$
Temps de décharge	$\mu s < t < ms$	$1s < t < 30s$	$0.3\text{ heures} < t < 3\text{ heures}$
Rendement (charge /décharge)	$>95\%$	Entre 85% et 98%	Entre 70% et 85%
Densité de puissance (W/Kg)	$>10^6$	10^4	$<10^3$
Densité d'énergie (Wh/Kg)	Entre 10 et 100	Entre 1 et 10	Entre 10 et 100
Durée de vie nombre de cycles	10^{10}	10^6	10^3

Tab.III.1 : comparaison entre les éléments de stockage

D'après les données du tableau ci-dessus, il est clair que le supercondensateur est un élément potentiel pour le stockage de l'énergie embarquée comme source pour la demande de fortes puissances pendant quelques secondes. Son utilisation permet dans le domaine de l'automobile de diminuer la pollution liée aux gaz d'échappement. Des études réalisées dans ce domaine ont démontrées que l'utilisation des supercondensateurs dans le véhicule permet de réduire d'environ 15% sa consommation, et jusqu'à 20% celle des bus pour le transport collectif.

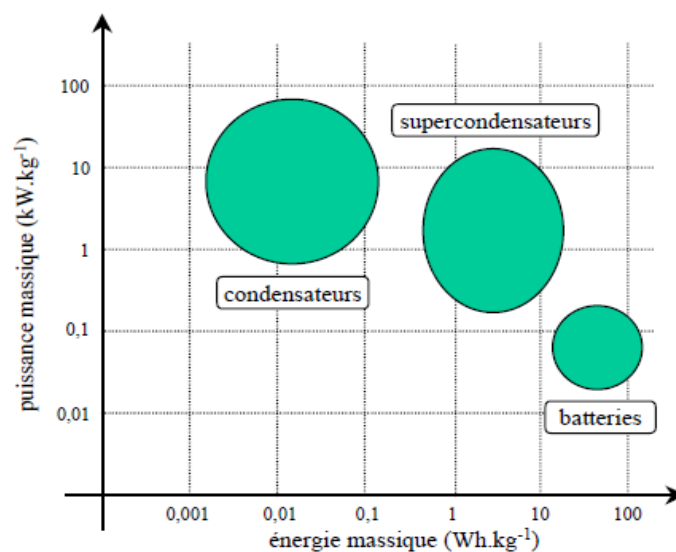


Fig.III.5: Schéma comparatif

Chapitre III : Généralités sur les supercondensateurs

III.6 Supercondensateurs : avantages, inconvénients

III.6.1 Les avantages [28]

- 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.

III.6.2 Les inconvénients [28]

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

III.7 Modélisation comportementale des supercondensateurs [28]

Le but de ce travail de modélisation consiste à définir tout d'abord le modèle comportemental d'une cellule puis celui du pack des super condensateurs formé de plusieurs cellules en série. Dans la littérature de nombreux modèles sont proposés [20], [21]. En d'autres termes, plus le modèle de la cellule élémentaire est complexe, plus le modèle du pack des super condensateurs devient difficile voir impossible à mettre en

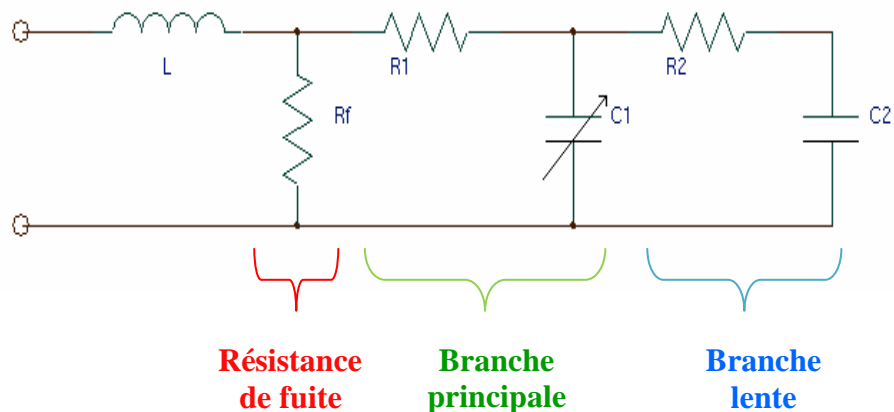
Chapitre III : Généralités sur les supercondensateurs

équation. C'est pour cette raison qu'on ne cherchera pas à établir un modèle sophistiqué qui tient compte de tous les phénomènes physique des super condensateurs.

Notre approche consiste donc à étudier et à simplifier les modèles comportementaux existants sans que la précision et le comportement électrique du composant soient altérés.

III.7.1 Modélisation des Supercondensateurs

On peut modéliser assez simplement un supercondensateur 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 plus part 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 1m Ω 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 : [28]

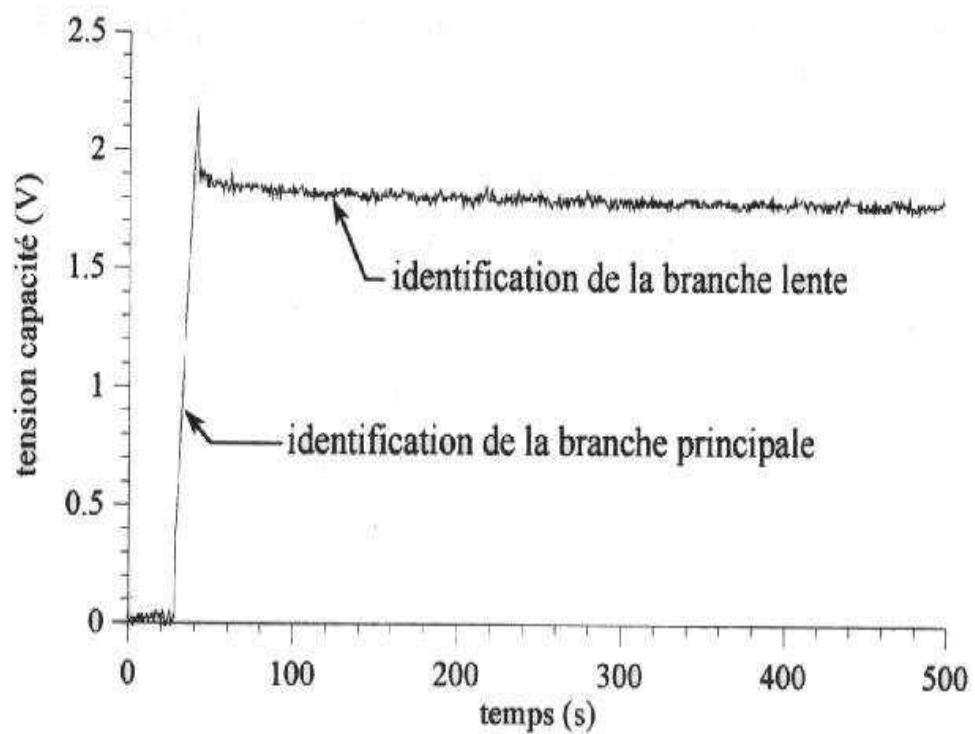


Fig.III.6 : Modèle des super condensateurs à deux branches RC [17].

C'est R. Bonert et L. Zubieta qui avaient présenté le premier véritable modèle des super condensateurs de puissance, **Fig. III.7** Ce modèle à deux branches RC

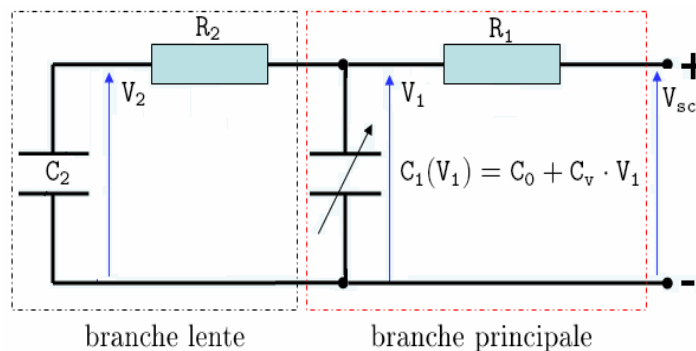


Fig. III.7: Modèle de R. Bonert et L. Zubieta

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. III.7) :

- 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,

Chapitre III : Généralités sur les supercondensateurs

- 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 :

$$C_1(V_1) = C_0 + k_v \cdot V_1 \quad (\text{III.1})$$

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.

III. 7.2 Modèle d'une cellule sans branche lente [17,19]

En négligeant la branche lente du modèle de R. Bonert et L. Zubietta, Fig.III.8, le modèle du super condensateur devient équivalent à la branche principale, Fig.III.8. 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.

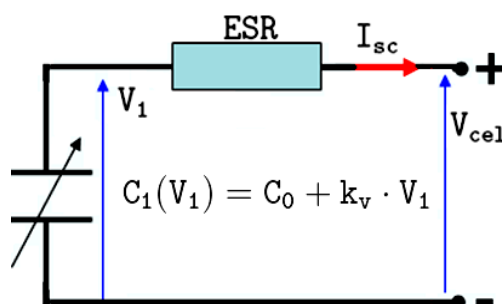


Fig.III.8: Modèle de la cellule sans branche lente

Chapitre III : Généralités sur les supercondensateurs

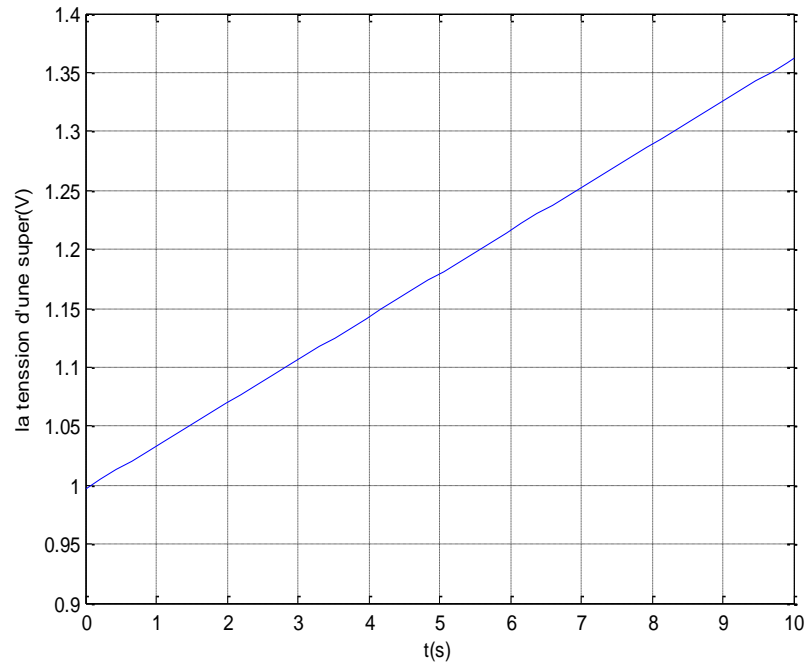


Fig.III.9 : La tension V_{cel} (V) a une valeur initiale égale à 1V chargé complète d'un courant du 100A

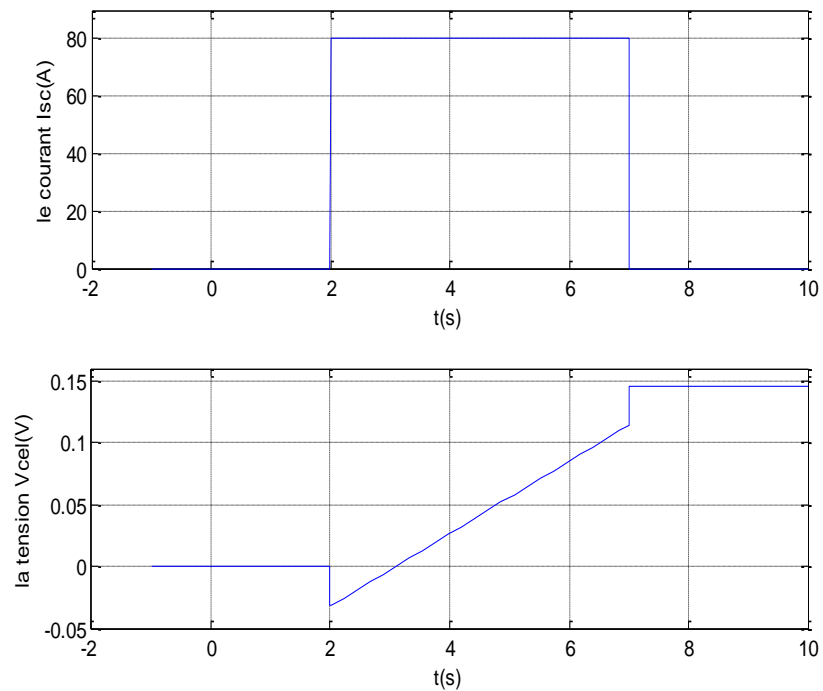


Fig.III.10 : chargement de la capacité pendant les (5s) la valeur initiale de la tension égale à 0V

III.8 Conclusion

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

Les supercondensateurs sont utilisés dans notre application, comme moyen fiable de stockage 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}).

Donc il a été question des principes de stockage d'énergie dans les supercondensateurs à couche double électrique, principes qui débouchent sur deux propriétés fondamentales de la capacité de stockage de ce type de dispositifs :

- non-linéarité, conséquence de la nature même de la couche double électrique,
- distribution spatiale, conséquence de la structure poreuse des électrodes.

La modélisation du comportement des supercondensateurs doit tenir compte des propriétés suscitées, puisqu'ils sont des dispositifs de stockage, de leur comportement énergétique.

De ce point de vue, le modèle à deux branches élaboré par R. Bonert et L. Zubieta est intéressant, et nous conserverons d'ailleurs son principe de partition de l'énergie, principe qui pose clairement la problématique de la disponibilité de l'énergie stockée dans les supercondensateurs.

Chapitre IV

Commande de la source hybride:
pile à combustible/supercondensateurs

Chapitre IV

Commande de la source hybride: pile à combustible/supercondensateurs

IV.1 Introduction

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

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

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

IV.2 Source embarqué utilisant une Pile à combustible [30]

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

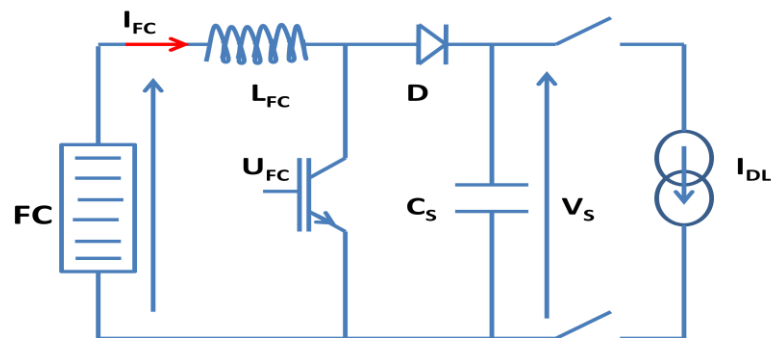


Fig.IV.1 : Schéma électrique du convertisseur.

IV.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 :

$$\begin{cases} V_{FC} = L_{FC} \frac{dI_{FC}}{dt} \\ 0 = C_S \frac{dV_S}{dt} + I_{DL} \end{cases} \quad (IV-1)$$

-Lorsque T est ouvert :

$$\begin{cases} V_{FC} = L_{FC} \frac{dI_{FC}}{dt} + V_S \\ I_{FC} = C_S \frac{dV_S}{dt} + I_{DL} \end{cases} \quad (IV-2)$$

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.

$$\begin{cases} L_{FC} \cdot \frac{dI_{FC}}{dt} = V_{FC} - (1 - U_{FC}) \cdot V_S \\ C_S \cdot \frac{dV_S}{dt} = -I_{DL} + (1 - U_{FC}) \cdot I_{FC} \end{cases} \quad (IV-3)$$

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 :

$$\begin{cases} \frac{dI_{FC}}{dt} = \frac{V_{FC}}{L_{FC}} - (1 - D) \cdot \frac{V_S}{L_{FC}} \\ \frac{dV_S}{dt} = -\frac{V_S}{RC_S} + (1 - D) \cdot \frac{I_{FC}}{C_S} \end{cases} \quad (IV.4)$$

IV.2.2 Commande du hacheur survolteur

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

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

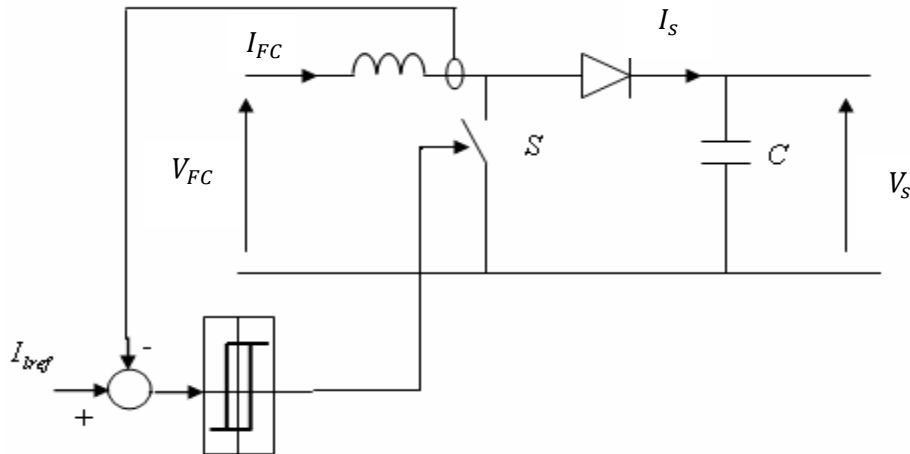


Fig.IV.2: Régulation de la tension du bus par hacheur

Quant à la boucle de tension, elle assure une valeur de tension constante en sortie du convertisseur. Dans la structure cascade, elle permet de générer la consigne de la boucle de courant. Cette boucle de tension doit être lente par rapport à la boucle de courant. Le correcteur choisi est un régulateur PI.

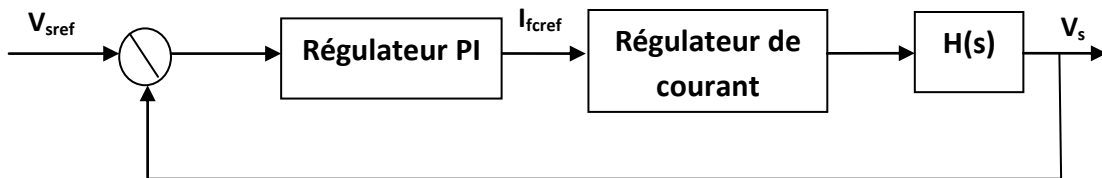


Fig.IV.3 : Régulation de la tension du bus par hacheur

Le correcteur utilisé est un correcteur de type proportionnel intégral de la forme :

$$H_{PI}(s) = K_I \left(1 + \frac{1}{T_I s} \right) \quad (IV.5)$$

On part de l'équation du système

$$(1 - D)I_{FC} = \frac{V_{FC}}{V_S} I_{FC} = C_S \frac{dV_S}{dt} + \frac{V_S}{R} \quad (IV.6)$$

D'où :

$$V_{FC} I_{FC} = C_S V_S \frac{dV_S}{dt} + \frac{V_S^2}{R} \quad (IV.7)$$

On fait le changement de variable $N = V_S^2$ et on obtient la fonction de transfert

$$\frac{N}{I_{FC}} = \frac{V_{FC}}{C_S s + \frac{1}{R}} \quad (IV.8)$$

Chapitre IV : Commande de la source hybride : pile à combustible/supercondensateurs

$$H(s) = \frac{N}{I_{FC}} = \frac{V_{FC}}{C_S s + \frac{1}{R}}$$

La fonction de transfert en boucle ouverte du système vaut :

$$H_{bo}(s) = K_1 \left(1 + \frac{1}{T_1 s} \right) \left(\frac{V_{FC}}{C_S s + \frac{1}{R}} \right) \quad (IV.9)$$

La fonction de transfert en boucle fermée du système est donc :

$$H_{bf}(s) = \frac{H_{bo}(s)}{1 + H_{bo}(s)} \quad (IV.10)$$

$$H_{bf}(s) = \frac{(T_1 s + 1)}{\left(\frac{T_1 C_S}{K_1 V_{FC}} \right) s^2 + \left(\frac{T_1}{R K_1 V_{FC}} + T_1 \right) s + 1} \quad (IV.11)$$

Soit les paramètres du régulateur de tension :

$$K_1 = \frac{2\xi R C_S w_{Bp} - 1}{R V_{FC}} \text{ et } T_1 = \frac{2\xi R C_S w_{Bp} - 1}{R C_S w_{Bp}^2}$$

Les valeurs de K_1 et T_1 sont déduites des simulations : $K_1 = 4.699 \cdot 10^4$; $K_p = 30.8$; $w_{Bp} = 6.2832 \cdot 10^4$.

IV.3 Schéma de simulation

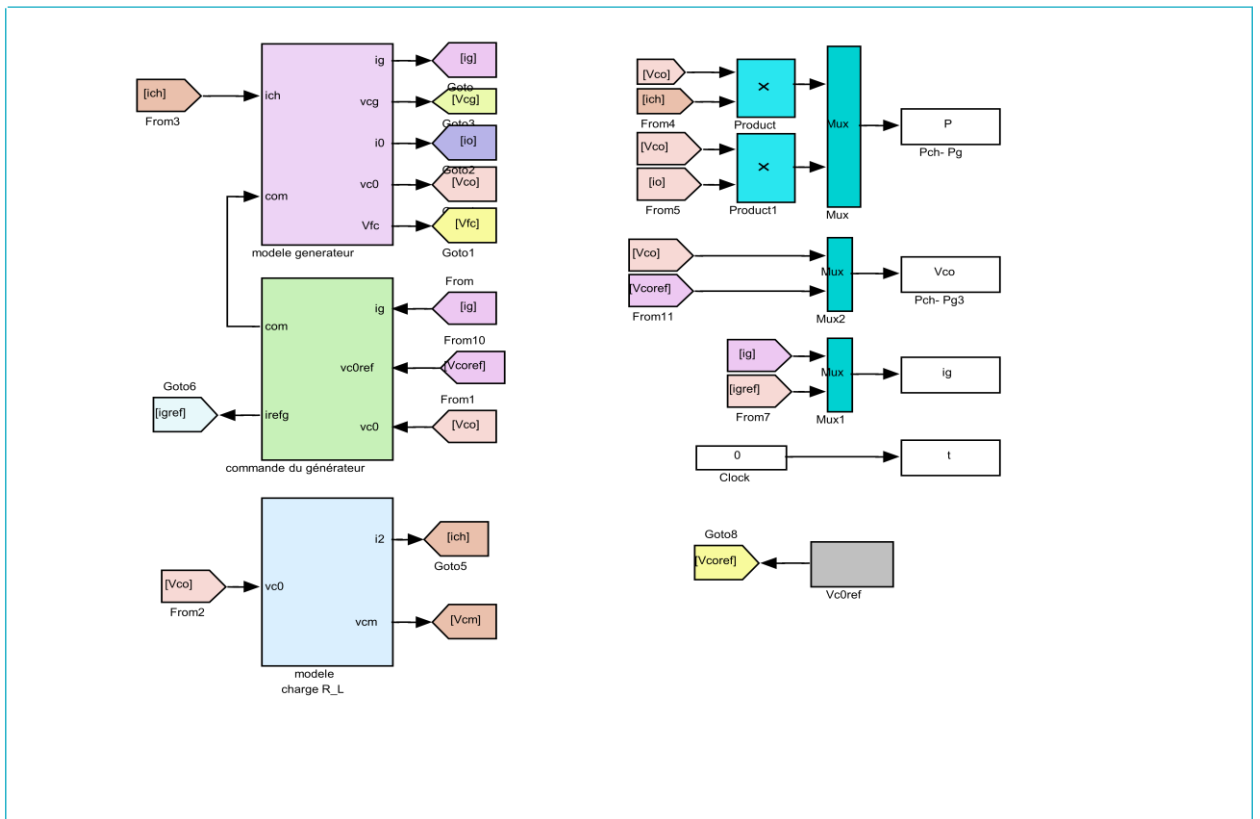


Fig.IV.4 : MATLAB/Simulink modèle de la PEM avec boost convertisseur

Chapitre IV : Commande de la source hybride : pile à combustible/supercondensateurs

La pile est connectée sur le bus via un convertisseur DC-DC non réversible en courant (la puissance ne peut pas être récupérée sur la pile).

On a control le système par un régulateur PI pour maintenir une tension constante du bus continu lors des appels de puissance.

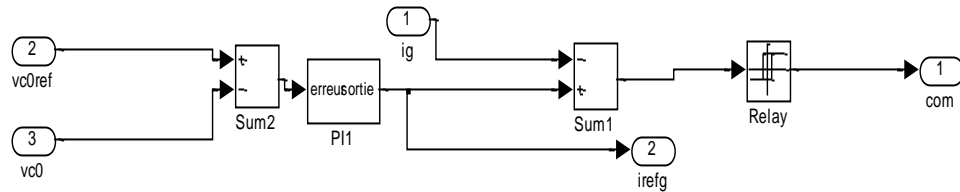


Fig.IV.5 : Contrôle du convertisseur de la pile

IV.4 Résultat de la simulation

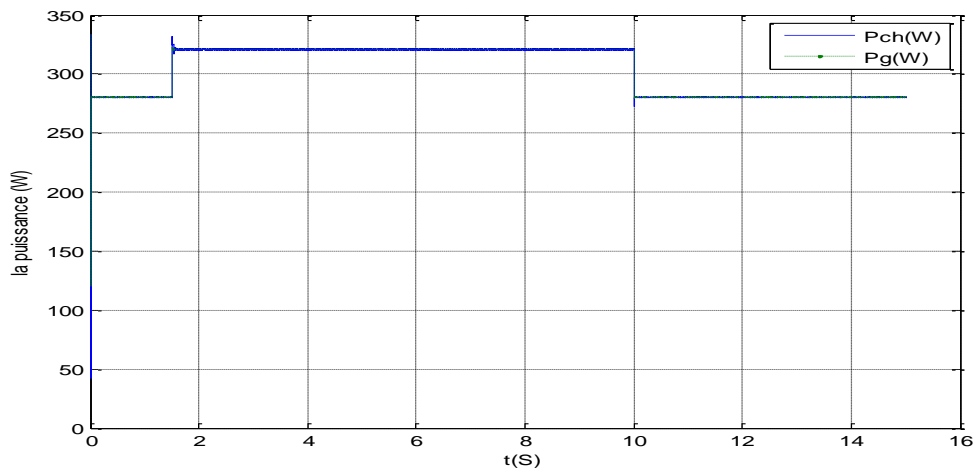


Fig. IV.6 : La puissance de générateur avec la puissance de charge

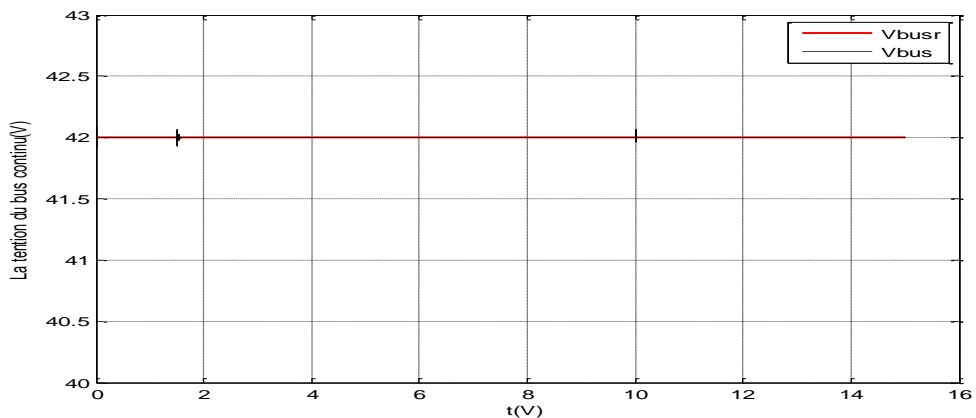


Fig.IV.7 : La tension du bus continu avec la référence

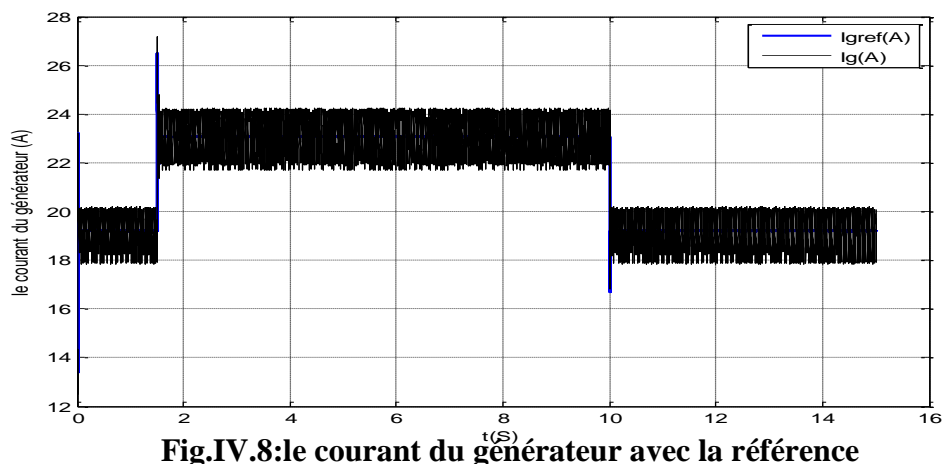


Fig.IV.8:le courant du générateur avec la référence

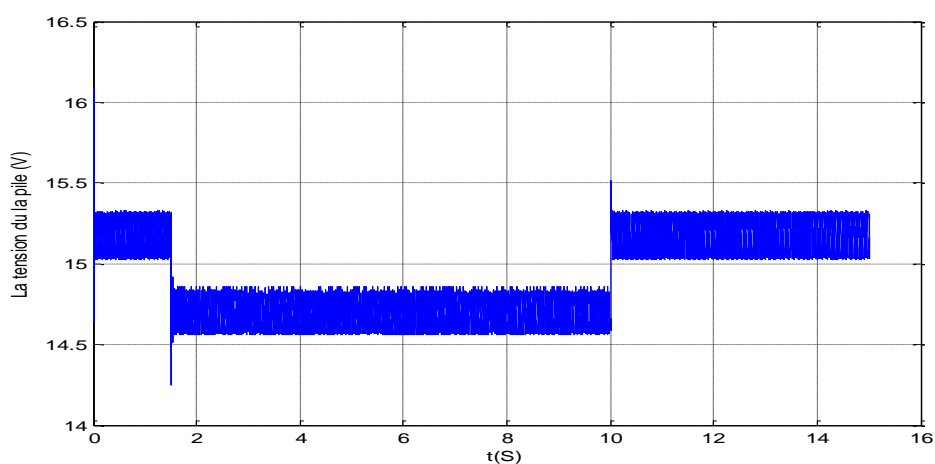


Fig.IV.9 : La tension de la pile à combustible

IV.5 Interprétation des résultats

Dans la figure IV.6, sont présentées les puissances du générateur et de la charge. On remarque que la puissance du générateur suit de la charge, quelle que soit les perturbations provoquées par la charge, car la source principale du système est une pile à combustible. Ainsi la relation entre les deux puissances est proportionnelle, autrement dit si la puissance du générateur augmente celle de la charge augmente aussi et si la puissance du générateur diminue, celle de la charge diminue aussi.

Dans la figure IV.7, sont présentées la tension du bus continu avec sa référence, on observe que la tension du bus continu suit bien sa référence malgré les variations de la charge. Néanmoins on remarque qu'aux moments $t=1,5$ s et $t=10$ s la charge varie et entraîne des variations minimales de la tension du bus continu durant des laps de temps insignifiants, puis cette tension reprend le chemin de sa référence.

Chapitre IV : Commande de la source hybride : pile à combustible/supercondensateurs

Dans la figure IV.8, sont présentés le courant du générateur avec sa référence, on observe que ce courant suit bien sa référence. Il est à remarqué que durant la période de 1s à 10s, ce courant du générateur augmente en fonction de l'augmentation de la puissance du générateur.

Dans la figure IV.9, est présentée la tension de la pile à combustible, on observe de sa variation est inversement proportionnelle à celle du courant ; donc tant que la charge augmente cette tension va diminuer.

IV.6 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 [1].

IV.6.1 Objectif de la commande par mode glissant

L'objectif de la commande par mode glissant se résume en deux points essentiels :

- Synthétiser une surface $S(X, t)$ telle que toutes les trajectoires du système obéissent à un comportement désiré de poursuite, régulation et stabilité ;
- Déterminer un loi de commande (commutation), $U(X, t)$ qui est capable d'attirer toutes les trajectoires d'état vers la surface de glissement et les maintenir sur cette surface [31].

IV.6.2 PRINCIPE DU REGLAGE PAR MODE GLISSANT [32]

La technique des modes glissants consiste à amener la trajectoire d'état d'un système vers la surface de glissement et de la faire commuter à l'aide d'une logique de commutation appropriée autour de celle-ci jusqu' au point d'équilibre, d'où le phénomène de glissement. Parmi les propriétés des modes glissants:

Chapitre IV : Commande de la source hybride : pile á combustible/supercondensateurs

- La trajectoire d'état du système en mode de glissement appartient à une surface de dimension inférieure à celle de l'espace d'état, par conséquent l'ordre des équations différentielles régissant le fonctionnement du système en mode de glissement est réduit.
- La théorie des modes glissants s'adapte bien pour les systèmes dont la commande est discontinue.
- La dynamique du système en mode de glissement est déterminée uniquement par le choix des coefficients de la surface de glissement.

– Soit le système dynamique non-linéaire analytique suivant:

$$\frac{dx}{dt} = F(x, t) + g(x, t)U \quad (\text{IV-12})$$

Où $x \in X$, un ouvert de \mathbb{R}^n et U est la fonction de commande (discontinue).

$U : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$, $F(x, t)$ et $g(x, t)$; des champs des vecteurs définis dans un ouvert de \mathbb{R}^n , avec $g(x, t) \neq 0, \forall : x \in X$.

Soit s une fonction continue $s : x \rightarrow \mathbb{R}$; dont le gradient est non nul sur x , l'ensemble : $s = \{x \in \mathbb{R}^n : s(x) = 0\}$, définie une surface régulière de dimension $(n - 1)$ dans x , appelée aussi surface de glissement.

Une condition nécessaire pour l'existence des régimes glissants est que la condition de transversalité (IV-14), doit être localement satisfaite sur s .

$$L_g s \neq 0 \quad (\text{IV-13})$$

Si le régime glissant existe localement sur s alors :

$$L_g s < 0 \quad (\text{IV-14})$$

La condition nécessaire et suffisante d'existence locale des régimes glissants est donnée par le système :

$$\begin{cases} (L_F + g U_{\min} s) + \frac{\partial s}{\partial t} < 0 & \text{si } s \rightarrow 0^+ \\ (L_F + g U_{\max} s) + \frac{\partial s}{\partial t} > 0 & \text{si } s \rightarrow 0^- \end{cases} \quad (\text{IV-15})$$

Où : $L_g s$, est la dérivée de Lie de la quantité s suivant le champ de vecteur g est donnée par :

$$L_g s = \frac{\partial s}{\partial x} g, \quad \frac{\partial s}{\partial x} = \begin{bmatrix} \frac{\partial s}{\partial x_1} \\ \vdots \\ \frac{\partial s}{\partial x_n} \end{bmatrix} \quad (\text{IV-16})$$

A partir du système d'inégalité (IV-15), on arrive à donner les états du système (IV-12) par les paramètres de celui-ci, ceci nous conduit donc à délimiter le domaine d'existence des régimes glissants.

Chapitre IV : Commande de la source hybride : pile à combustible/supercondensateurs

IV.6.3 Système à structure variable

Dans le système de réglage à structure variable, on peut distinguer deux configurations de base différentes :

- La première configuration change la structure par commutation d'une contre-réaction d'état variable,
- La deuxième configuration change la structure par commutation au niveau de l'organe de commande.

IV.6.3.1 Configuration avec changement de la structure par commutation d'une contre-réaction d'état variable [32]

L'organe de commande reçoit dans ce cas une tension de commande u_{cm} qui commute rapidement entre deux variables U_{cm1} et U_{cm2} , voir «**Fig.IV.11**», ce qui peut provoquer des fortes sollicitations de l'organe de commande, cet inconvénient empêche très souvent une réalisation pratique de cette configuration .

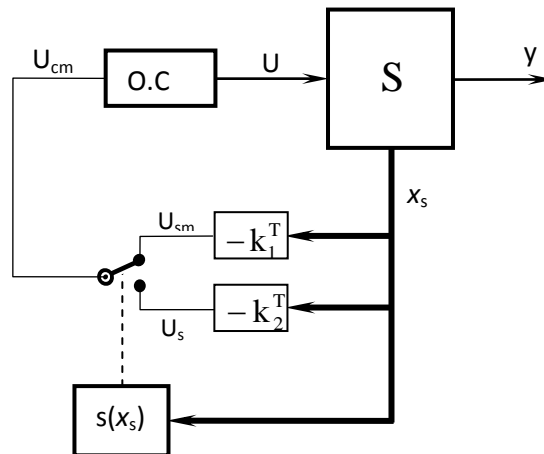


Fig. IV.10 : Système de réglage à structure variable avec changement de la structure par commutation d'une contre réaction d'état variable.

O.CM : organe de commande ;

s: système à commander ;

$s(x_s)$: surface de glissement ;

u_{cm} : tension de commande ;

x_s : vecteur d'état global de dimension n_s .

Suivant que $s(x_s)$ est positif ou négatif, la commande U est donnée par :

$$U_{cm} = \begin{cases} U_{cm1} = -k_1^T x_s & \text{pour } s(x_s) > 0 \\ U_{cm2} = -k_2^T x_s & \text{pour } s(x_s) < 0 \end{cases} \quad (\text{IV.17})$$

$k_{1,2}^T$: Gains du retour d'état.

IV.6.3.2 Configuration avec changement de la structure par commutation au niveau de l'organe de commande [32]

Dans ce cas l'organe de commande (O.CM) doit être conçu de sorte que la grandeur de commande ne prenne que les deux valeurs U_{max} et U_{min} . La commutation entre ces deux valeurs est imposée par la loi de commutation selon :

$$U = \begin{cases} U_{max} & \text{si } s(x) > 0 \\ U_{min} & \text{si } s(x) < 0 \end{cases} \quad (IV.18)$$

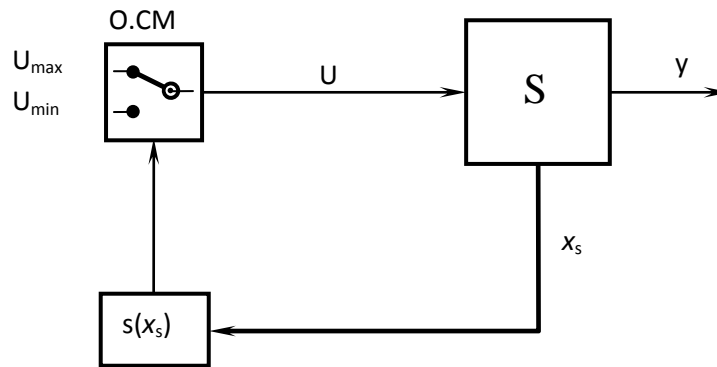


Fig.IV.11 : Configuration avec changement de structure par commutation de l'organe de commande.

Cette configuration nécessite un organe de commande qui possède une action à deux positions avec une commutation rapide d'une position à l'autre. L'électronique de puissance met à disposition un organe de commande qui répond parfaitement aux exigences posées ; c'est le variateur de courant continu à pulsation ; ce dernier est utilisé pour alimenter des moteurs à courant continu, il y a aussi des onduleurs monophasés ou triphasés à pulsation, qui sont employés pour l'alimentation du stator des machines à courant alternatif [32].

IV.6.4 CONDITIONS D'EXISTENCE DU MODE GLISSANT

Les conditions de convergence permettent aux dynamiques du système dans le plan de phase de converger vers la surface de glissement.

Le mode glissant existe lorsque les commutations ont lieu continûment entre U_{max} et U_{min} , ce phénomène est illustré dans la figure.IV.12, pour le cas d'un système de réglage du deuxième ordre avec les deux grandeurs d'état x_{s1} et x_{s2} [32].

On admet d'abord une hystérèse sur la loi de commutation $s(x_s) = 0$ (droite en trait mixte) les droites décalées parallèlement de $\pm \Delta s'_h$. Une trajectoire avec $U = U_{max}$ touche au point «a» le seuil de basculement inférieur. Si avec $U = U_{min}$ la trajectoire est orientée vers l'intérieure de la zone de hystérèse, elle touche au point «b» le seuil de basculement

Chapitre IV : Commande de la source hybride : pile à combustible/supercondensateurs

supérieure au à lieu une commutation sur $U = U_{\max}$. Si la trajectoire est de nouveau orientée vers l'intérieure, elle touche au point «c» le seuil de basculement inférieure et ainsi de suite. Il y a donc un mouvement continu à l'intérieure la zone de l'hystérèse.

Ce mouvement s'approche du régime stationnaire dans une certaine zone où des commutations continues existent. La fréquence de commutation est finie par la suite, on supposera une hystérèse infiniment petite, dans un tel cas, la loi de commutation fait un mouvement infiniment petit autour de :

$$s(x_s) = -k_s^T x_s + w k_w = 0. \quad (\text{IV.19})$$

Par conséquent le vecteur d'état x_s suit une trajectoire qui respecte cette condition, la fréquence est alors infiniment élevée [32].

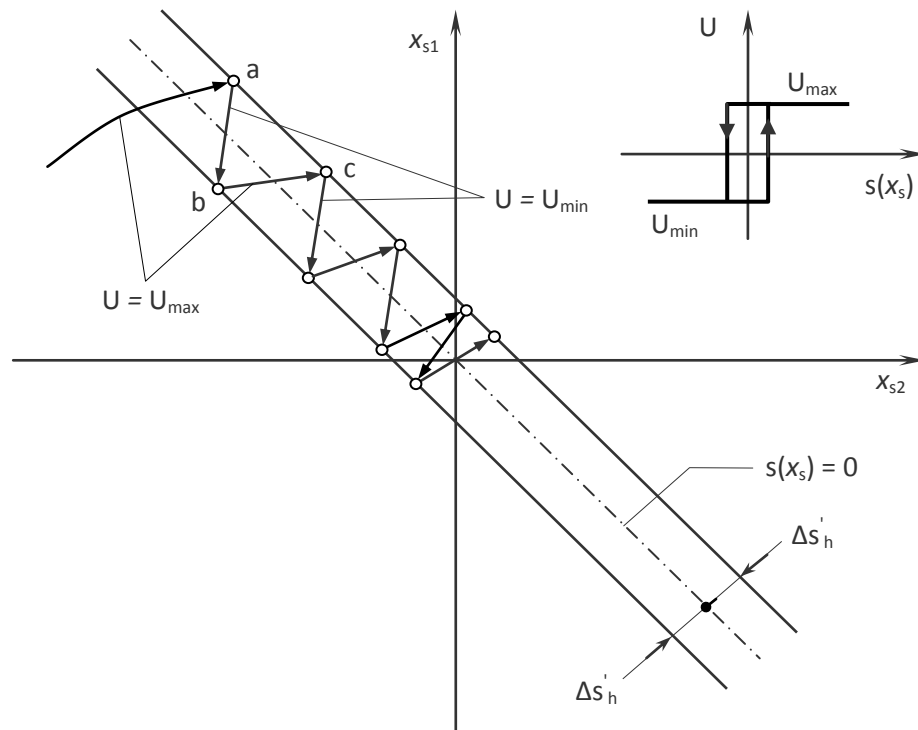


Fig. IV.12 Démonstration du mode de glissement

IV.6.5 Fonction de LYAPUNOV [19 ; 33]

Il s'agit de formuler une fonction scalaire positive $V(x) > 0$ pour les variables d'état du système, et de choisir la loi de commutation qui fera décroître cette fonction (i.e. $\dot{V}(x) < 0$) Cette fonction est généralement utilisée pour garantir la stabilité des systèmes non linéaires.

En définissant la fonction de Lyapunov par :

$$V(x) = \frac{1}{2} S^2(x) \quad (\text{IV.20})$$

Et sa dérivée par :

Chapitre IV : Commande de la source hybride : pile à combustible/supercondensateurs

$$\dot{V}(x) = S(x)\dot{S}(x) \quad (\text{IV.21})$$

Pour que la fonction de Lyapunov décroisse, il suffit d'assurer que sa dérivée est négative. Ceci est vérifié si :

$$S(x)\dot{S}(x) < 0 \quad (\text{IV.22})$$

Cette équation montre que le carré de la distance vers la surface, mesuré par $S^2(x)$, diminue tout le temps, contraignant la trajectoire du système à se diriger vers la surface des deux cotés (Fig.IV.13). Cette condition suppose un régime glissant idéal.

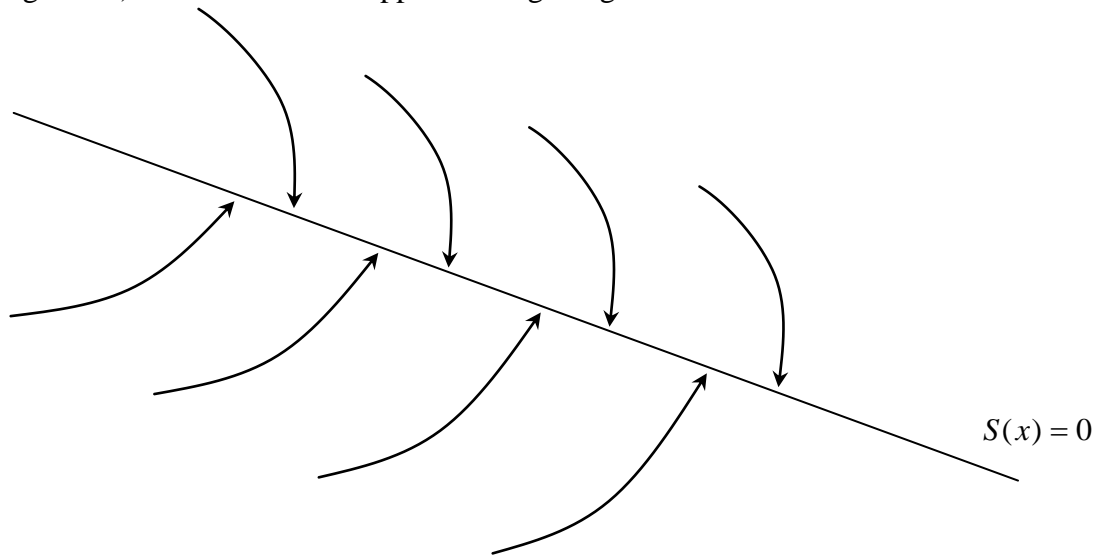


Fig. IV.13 : Trajectoire de l'état vis-à-vis la surface de glissement. [19 ; 33]

IV.7 Source embarqué utilisant une pile à combustible et des supercondensateurs [34]

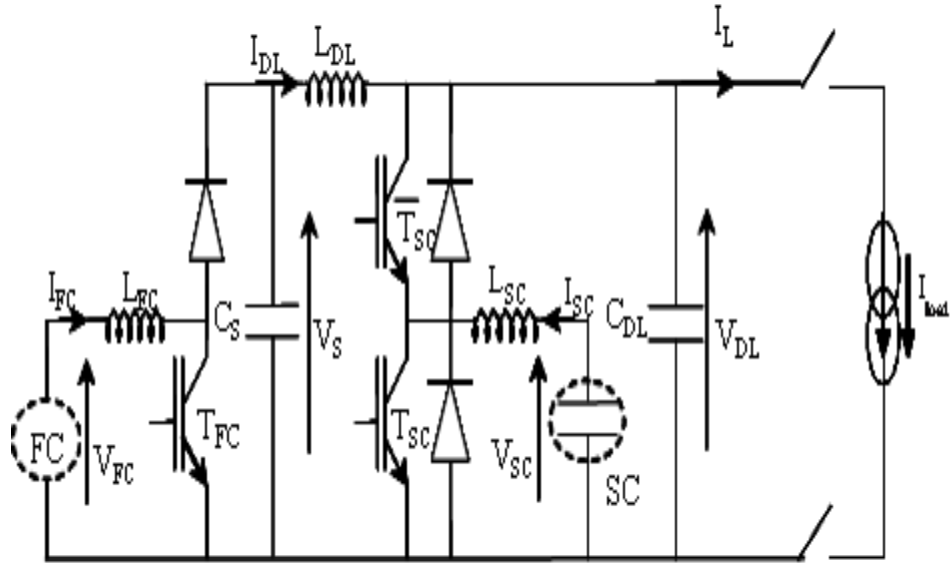


Fig. IV.14 : La Structure d'hybride source

IV.7.1 Modélisation de système

$$\left\{ \begin{array}{l} L_{DL} \frac{dI_{DL}}{dt} = (V_S - V_{DL}) - r_{DL} \cdot I_{DL} \end{array} \right. \quad (IV.23)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} C_{DL} \frac{dV_{DL}}{dt} = I_{DL} - I_L + I_{SC}(1 - U_{SC}) \end{array} \right. \quad (IV.24)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} L_{SC} \cdot \frac{dI_{SC}}{dt} = V_{SC} - (1 - U_{SC}) \cdot V_{DL} - r_{SC} \cdot I_{SC} \end{array} \right. \quad (IV.25)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} C_{SC} \cdot \frac{dV_{SC}}{dt} = -I_{SC} \end{array} \right. \quad (IV.26)$$

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

$$\left\{ \begin{array}{l} L_{FC} \cdot \frac{dI_{FC}}{dt} = V_{FC} - (1 - U_{FC}) \cdot V_S - r_{FC} \cdot I_{FC} \end{array} \right. \quad (IV.27)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} C_S \cdot \frac{dV_S}{dt} = -I_{DL} + (1 - U_{FC}) \cdot I_{FC} \end{array} \right. \quad (IV.28)$$

Chapitre IV : Commande de la source hybride : pile à combustible/supercondensateurs

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

IV.7.2 Application de la commande mode glissement [31, 34,35]

Principe de contrôle du convertisseur DC-DC des supercondensateurs

$$S = k_1 \cdot (V_{DL}^* - V_{DL}) + k_2 (I_{SC} - I) \quad (IV.29)$$

$$\text{Avec : } I = k_{ps} \cdot (V_{SC} - V_{SC}^*) + k_{is} \cdot \int_0^t (V_{SC} - V_{SC}^*) dt \quad (IV.30)$$

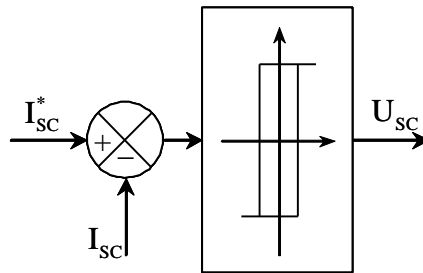


Fig.IV.15 : Contrôle du convertisseur des supercondensateurs

$$U = U_{SC} ;$$

$$X = [V_{DL} \ I_{SC} \ V_{SC} \ I]^T \quad (IV.31)$$

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

$$\dot{X} = A X + B U + C + \xi \quad (IV.32)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{V}_{DL} = \frac{I_{DL}}{C_{DL}} - \frac{I_L}{C_{DL}} + \frac{I_{SC}}{C_{DL}} (1 - U_{SC}) \quad (IV.33) \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{I}_{SC} = \frac{V_{SC}}{L_{SC}} - (1 - U_{SC}) \frac{V_{DL}}{L_{SC}} - \frac{r_{SC}}{L_{SC}} I_{SC} \quad (IV.34) \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{V}_{SC} = -\frac{I_{SC}}{C_{SC}} \quad (IV.35) \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{I} = -\frac{K_{ps}}{C_{SC}} I_{SC} + K_{is} (V_{SC} - V_{SC}^*) \quad (IV.36) \end{array} \right.$$

Chapitre IV : Commande de la source hybride : pile á combustible/supercondensateurs

$$A = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{C_{DL}} & 0 & 0 \\ \frac{-1}{L_{SC}} & -\frac{r_{SC}}{L_{SC}} & \frac{1}{L_{SC}} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{C_{SC}} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{K_{ps}}{C_{SC}} & K_{is} & 0 \end{bmatrix}$$

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

$$\xi = \begin{bmatrix} \frac{I_{DL} - I_L}{C_{DL}} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T$$

$$C = [0 \ 0 \ 0 \ -K_{is} \ V_{SC}]^T$$

Si nous notons :

$$G = [K_1 \ K_2 \ 0 \ -K_2] \quad (\text{IV.37})$$

La surface de glissement est donnée par:

$$S = C_{DL} \xi + G X \quad (\text{IV.38})$$

$$\dot{S} = -\lambda S - K \text{sign}(S) \quad (\text{IV.39})$$

Avec :

$$K = 0 \quad \text{Si } \|S\| < \varepsilon \quad (\text{IV.40})$$

$$K = n\lambda\varepsilon \quad \text{Si } \|S\| > \varepsilon \quad (\text{IV.41})$$

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 $\lambda (\leq f_c/2)$ assure une petite erreur statique lorsque $\|S\| < \varepsilon$. Le terme non-Linéaire $-K \text{sign}(S)$ permet le rejet 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 $(\lambda, K, \varepsilon)$ 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

Chapitre IV : Commande de la source hybride : pile à combustible/supercondensateurs

glissement. Nous utilisons l'équation (IV.33), (IV.39) et (IV.40), nous trouvons pour le premier système:[35;34]

$$U_{Sceq} = (G B)^{-1} \{-G A X - G C - \lambda G X - K \text{sign}(S) - C_{DL}[\dot{\xi} + \lambda \xi]\} \quad (\text{IV.42})$$

(IV.32) et (IV.42) donnent l'équation suivante :

$$A_{eq} = A - G A - B(G B)^{-1} \lambda G \quad (\text{IV.43})$$

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

$$\lambda I - A_{eq} = 0 \quad (\text{IV.44})$$

Pour calculer les constantes K_{ps} et K_{is} les équations suivants :(IV.23), (IV.25), (IV.26) et (IV.29).

La condition nécessaire pour obtenir ces constantes est : $\Delta V_{DL} = 0 \Rightarrow V_{DL}$ toujours constante.

K_1, K_2, K_{ps}, K_{is} sont des constantes obtenus à partir de notre simulation.

IV.7.3 Le schéma de simulation

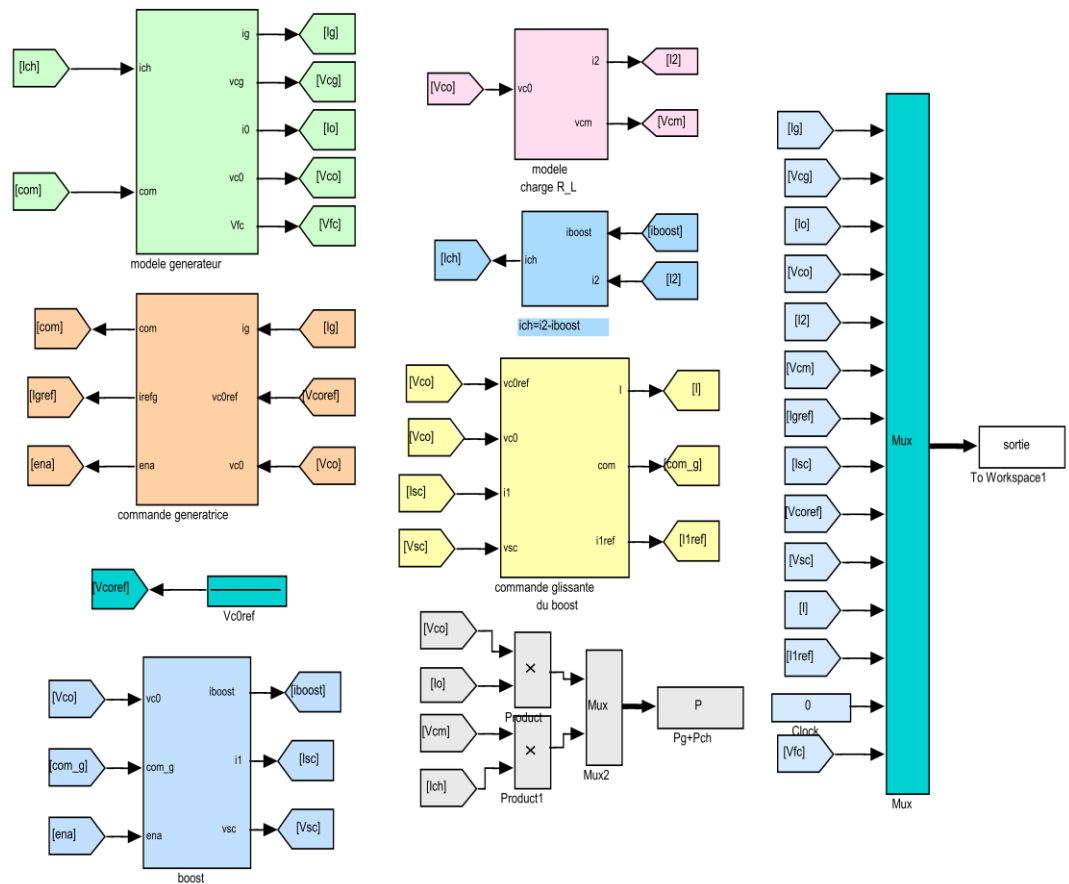


Fig.IV.16 : MATLAB/Simulink modèle de la PEM avec boost convertisseur

IV.7.4 Les résultats de simulation

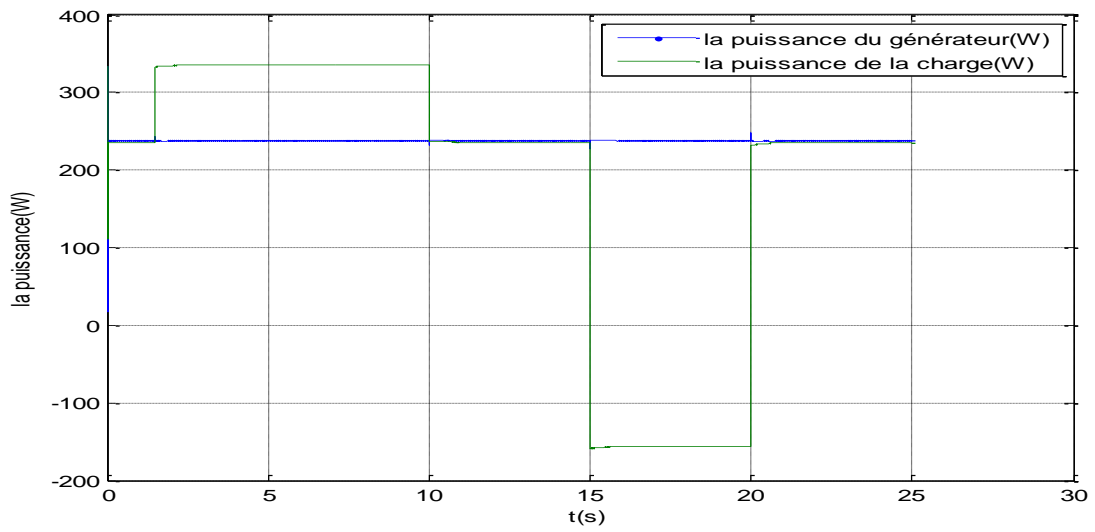


Fig.IV.17 : La puissance de la charge et la puissance de générateur

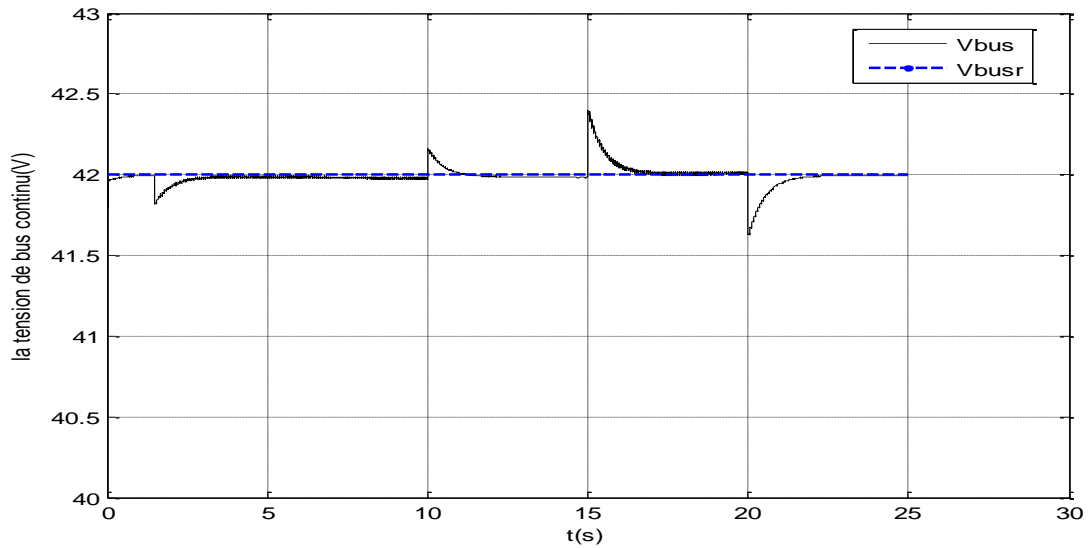


Fig.IV.18 : La tension du bus continu et la référence de cette tension

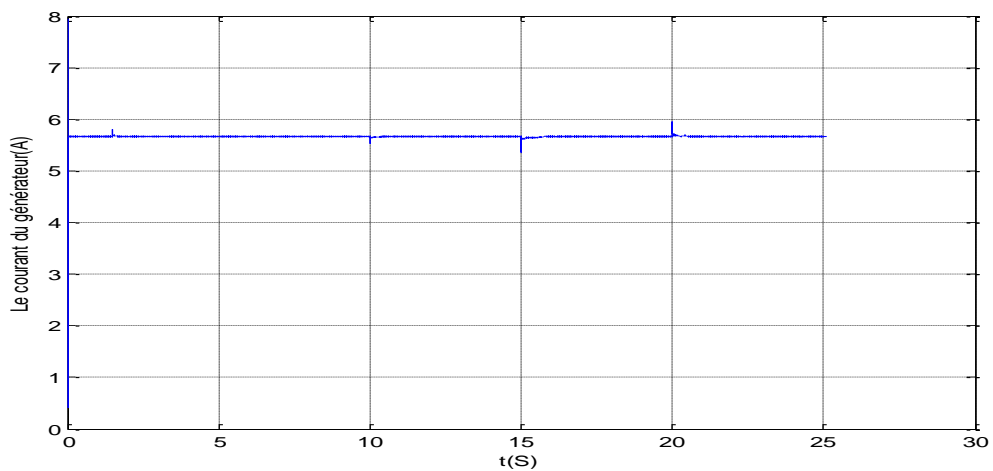


Fig.IV.19 : Le courant du générateur

Chapitre IV : Commande de la source hybride : pile à combustible/supercondensateurs

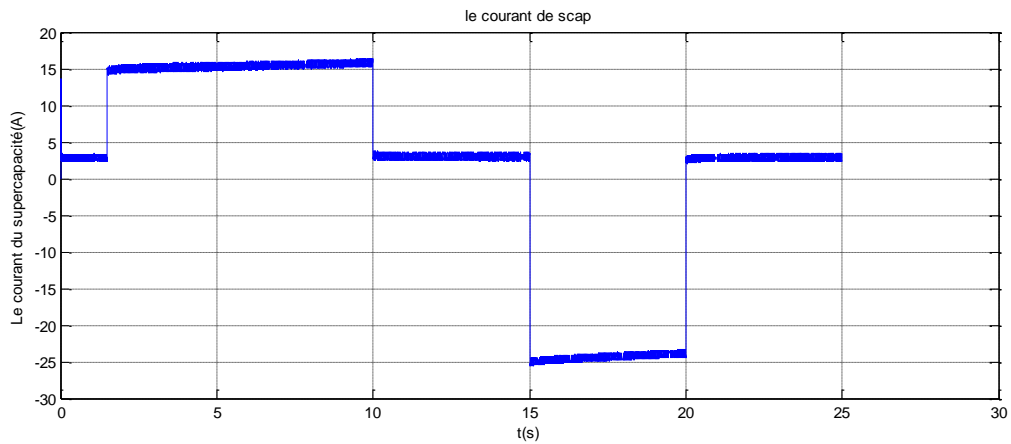


Fig.IV.20 : Le courant de la supercapacité

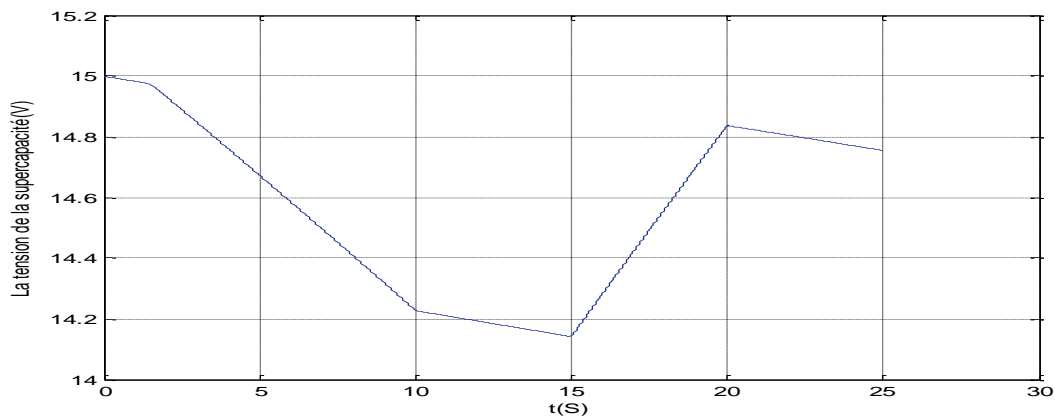


Fig.IV.21 : La tension du supercondensateur

IV.7.5 Interprétation des résultats

Dans la figure IV.17, sont présentées, en couleur bleue la puissance de générateur qui est toujours constante malgré les différentes variations de la charge ; en vert, la puissance de la charge comportant plusieurs variations, supérieure, inférieure ou égale à la puissance du générateur.

Dans la figure IV.18, sont présentées la tension du bus continu et sa référence, on observe que la tension du bus continu suit sa référence qui est égale à 42V quelque soit les variations de la charge. Toute perturbation de la charge entraîne une perturbation de la tension, mais ce dernier est insignifiant. La tension du bus continu reprend le chemin de la référence juste après la perturbation.

Dans la figure IV.19, est présenté le courant du générateur, qui est constant quelque soit les variations du la charge.

Chapitre IV : Commande de la source hybride : pile á combustible/supercondensateurs

Dans la figure IV.20, est présenté le courant de la supercapacité ; On remarque que dans l'intervalle du temps $2,5s < t < 10s$ la puissance de la charge devient supérieure à la puissance du générateur, ceci est du 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 l'intervalle où les deux puissances est égales la valeur du courant est très petite (à peu près 3A).

Dans la figure IV.21, est présentée la tension du la supercapacité ; à $t=0s$ la tension est maximale et égale à 15V, c'est le phénomène inverse du courant du la supercapacité. On remarque que la tension commence à diminuer légèrement jusqu'à $t=1,5s$ puis diminue rapidement (c'est la décharge) jusqu'à $t=10s$; puis continue sa diminution mais d'une manière légère jusqu'à $t=15s$; à partir de ce moment débute le chargement de la supercapacité et la tension commence à augmenter jusqu'à $t=20s$, puis rediminue légèrement jusqu'à $t=25s$.

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

IV.6 Les paramètre

Capacité De Sortie Boost	$C_S=8800\mu F$
Capacité Bus Continue	$C_{DC} = 3000\mu F$
Inductance Câblage Lissage Pile - SC	$L_{DC}=10 \mu H$
Résistance Enroulement De Câblage Pile - SC	$r_{DC}=1$
Inductance Boost/Buck	$L_{SC}=100 \mu H$
Tension De Référence Bus Continue	$V_{DLref} = 42 V$
Largeur d'hystérésis	$\epsilon_p = 2$

Paramètres de la charge	
Puissance de la charge	$P_0 = 500 w$
Inductance Câblage Lissage Pile - SC	$L_{CH} = 10 \mu H$
Capacité de filtrage de la charge	$C_{CH} = 1000 \mu F$
La résistance de la charge	$r_{ch}=V^2 c0ref/ P_0$

Paramètres de la Pile	
Inductance Série Avec La Pile :	$L_p = 0.2 mH$
Résistance Série Avec La Pile :	$r_p = 0.04 \Omega$
Tension Pile á Vide :	$E_p=24 V$

Chapitre IV : Commande de la source hybride : pile á combustible/supercondensateurs

Régulation du boost	
$f_c = 1 \text{ kHz}$	
$\tau_i = 1/ f_c$	
$k_i = 2. C_S .V_{DLref}/(\tau_i .E_p)$	
$k_{ip} = k_i/\tau_i$	
$k_{pp} = k_i$	
$t_p = k_{pp}/k_{ip}$	
$w_{pv}=2.\pi.10000$	

Régulation Supercondensateurs Régulation utilisant un PI	
$k_{is} = 2.1845$	
$k_{ps} = 14.336$	
$\tau_{sc} = k_{psc} /k_{isc}$	
$\omega_{pb}=2.\pi.100000$	

Paramètres du banc Supercondensateurs	
Valeur De La Super condensateurs	$C_{sc}= 96 \text{ F}$
Valeur De La Résistance Super condensateurs	$r_{sc}=0.05$
Tension Super condensateurs Nominale	$V_{sref} = 15\text{V}$

Chapitre IV : Commande de la source hybride : pile á combustible/supercondensateurs

IV.7 Conclusion

Dans ce chapitre on étudie deux parties. Dans la première partie on utilise la pile à combustible avec un hacheur élévateur pour commander et réguler la tension du bus continu avec un régulateur simple PI ; le générateur alimente une charge R-L.

Le but de la régulation de tension est de maintenir la tension de sortie du bus continu à une valeur fixe 42V quelque soit la variation de la charge.

Les résultats des simulations montrent que l'application d'un modèle de structure de la pile à combustible et convertisseur élévateur, en prenant en considération les capacités parasites, des résultats avec une meilleure compréhension du comportement du système contrôlé sur la base de pile à combustible PEM en tant que source d'énergie. Cela permet de nouvelles possibilités dans la recherche et peut entraîner grâce à un dimensionnement des composants et meilleur système de conception de contrôleur pour les systèmes de pouvoir.

Et dans deuxième partie on utilise une pile à combustible connecté par un hacheur boost et ainsi une supercapacité commandé par un hacheur back-boost toujours le première hacheur commandé par un régulateur simple PI et ainsi le hacheur back-boost commandé par un autre régulateur PI ; cette partie basé sur la commande par mode glissants parce que la dynamique du la supercapacité est très rapide si pour ca est la nécessité d'une commande robuste et rapide.

On observe que si la charge demandé une puissance supérieur à la puissance de générateur dans cette instant la supercapacité se déchargent la puissance demandé par la charge.

Par contre si la charge demander une puissance inférieure de la puissance du générateur dans cette instant la puissance l'énergie récupérer par le chargement du la supercapacité.

La tension de bus continu toujours suivies cette référence malgré les tous les variations de la charge ainsi la dynamique très rapide de la supercapacité parce que la commande utiliser dans cette partie et très robuste.

Conclusion générale

Conclusion générale

Ce présent travail concerne l'analyse d'une alimentation hybride pour la traction d'un véhicule hybride, constitué de deux sources et un convertisseur DC-DC. La principale source est une pile à combustible, la source auxiliaire est un supercondensateur. Notre objectif principal 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 quelque soit d'une part les variations brusque de la charge et d'autre part la dynamique rapide du supercondensateur.

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.

Dans un premier temps et après modélisation des sources et dans le but de régler la tension au niveau du bus continu, on a simulé la pile à combustible avec hacheur boost, en utilisant un simple régulateur PI. Les résultats obtenus ont été satisfaisants.

Dans un deuxième temps, 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 mode glissant pour ce dernier. Cette commande optimale a 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.

En perspective nous envisageons ce qui suit :

1. Il serait intéressant de consolider notre travail par des essais pratiques, pour valider les résultats de simulation.
2. On prévoit l'ajout d'une batterie LI-ion à notre système pour le stockage de longues durées.

Conclusion générale

3. L'ajout d'un panneau solaire comme deuxième source principale afin de l'utiliser durant la journée.
4. L'ajout d'un onduleur afin d'alimenter un moteur synchrone ou asynchrone.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] H.MAKER, « Optimisation et gestion d'énergie pour un système hybride : Association Pile à Combustible et supercondensateurs », thèse de doctorat, Université de Technologie Belfort Montbeliar , 2008
- [2] W.HANKACHE, « Gestion Optimisée de l'Energie électrique d'un groupe électrogène hybride à pile à combustible », thèse de doctorat, Institut National Polytechnique, 2008.
- [3] M.ZANDI, « Contribution Au Pilotage des sources Hybrides d'énergie électrique », thèse de doctorat, Université NANCY Institut National Polytechnique de LORRAIN, 2010.
- [4] J.BERNARD, « Véhicules hybrides à pile à combustible : dimensionnement et stratégies de commande », thèse de doctorat, Université de Valenciennes, et du Hainaut-Cambresis, 2007.
- [5] N.MAHERZI, « Etude, Conception et réalisation d'un convertisseur d'énergie DC/DC associé à des supercondensateurs mémoire d'ingénieur CNAM », Conservatoire National des Arts et METIERS LYON, 2010.
- [6] M.MONTARU, « Contribution à l'évaluation du vieillissement des batteries de puissance utilisées dans les véhicules hybrides selon leurs usages », thèse de doctorat, Institut Polytechnique de Grenoble, 2009.
- [7] J.SCordia, « Approche systématique de l'optimisation du dimensionnement et de l'élaboration de lois de gestion d'énergie de véhicule hybrides ». Doctorat de l'université Henri Poincaré-Nancy1, 2004.
- [8] S.DELPERT, « Evaluation de stratégies de commande pour véhicules hybrides parallèle », doctorat de l'Université de Valenciennes et de Hainaut Cambresis ,2002
- [9] G.ROUSSEAU, « Véhicule hybride et commande optimale », L'école National Supérieure des Mines De Paris, 2008.
- [10] A.DUBRAY, « Adaptation des lois de gestion d'énergie des véhicules hybrides suivant le profil de mission suivi », Doctorat de l'Institut Polytechnique de Grenoble, 2002
- [11] J.BERNARD, « Véhicules hybrides à pile à combustible : dimensionnement et stratégies de commande », thèse de doctorat, Université de Valenciennes, et du Hainaut-Cambresis, 2007.
- [12] B.WAHDAME, « Analyse et optimisation du fonctionnement de piles à

Bibliographie

- Combustible par la méthode des plans d'expériences », thèse de doctorat, université de technologie de belfort montbeliard et de l'université de France – Comté,2006.
- [13] A.PAYMAN, « Contribution à la gestion de l'énergie dans les systèmes hybrides Multi-sources Multi-charges », thèse de doctorat, L'institut National Polytechnique de Lorraine, 2009.
- [14] J.LACHAIZE, « Etude des stratégies et des structures de commande pour le pilotage des systèmes énergétiques à Pile à Combustible (PAC) destinés à la traction », thèse de doctorat, L'institut National Polytechnique de Toulouse, 2004.
- [15] I.VALERO EXPOSITO, « INTRFACAGE ET CONTROLE COMMANDE DE PILES A COMMBUSTIBLE POUR APPLICATIONS STATIONNAIRE ET TRANSPORT », THESE DE DOCTORAT, UNIVERSITE JOSEPH FOURIER ,2004.
- [16] R.SAISSET, « Contribution à l'étude systémique de dispositifs énergétiques à composants électrochimique. Formalisme Bond Graph appliqué aux piles à combustible, accumulateurs Lithium-Ion, Véhicule Solaire », thèse de doctorat, L'institut National Polytechnique de Toulouse ,2004
- [17] R. Benchrifa, D. Zejli, A. Bennouna; "Piles à combustible, mode efficace et propre de production d'électricité", International Congres on the Renewable Energies and the Environment, Sousse, Tunisia, March 2005.
- [18] P.THONTHONG, « CONCEPTION D'UNE SOURCE HYBIDE UTILISANT UNE PILE A COMBUSTIBLE ET DES SUPERCONDENSATEURS », THESE DE DOCTORAT, L'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE LORRAINE, 2005.
- [19] I.SADLI ; « MODELISATION PAR IMPEDANCE D'UNE PILE A COMBUSTIBLE PEM POUR UTILISATION EN ELECTRONIQUE DE PUISSANCE »; thèse de doctorat de L'INPL ; National Polytechnique de LORRAINE ; 2006
- [20] I. Sadli, P. Thounthong, J.P. Martin, S. Raël, B. Davat; "Behaviour of a PEMFC supplying a low voltage static converter"; Journal of Power Sources, Vol. 156, pp. 119-125, May 2006.
- [21] N .ROMANI , « Modélisation et Commande du système d'Alimentation en Air pour le Module de Puissance d'un véhicule à Pile à Combustible avec Reformeur

Bibliographie

- Embarqué », thèse de doctorat , Université Paris-SUD 11, 2007.
- [22] A.LACHICHI, « Modélisation et stabilité d'un régulateur hybride de courant – Application aux convertisseurs pour pile à combustible », thèse de doctorat Université de Franche-Comté, 2005.
- [23] F.RAFIK, H.GUALOUS, R.GALLAY, A.CRAUSAZ, A.BERTHON, « Caractéristique électrique et thermique des supercondensateurs », Actes de Electronique de Puissance du Futur, 4p., Grenoble, 2006.
- [24] M.Y.AYAD, « Mise en oeuvre des supercondensateurs dans les sources hybrides continues », Institut National Polytechnique De Lorraine, 2004.
- [25] 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.
- [26] H.GUALOUS, R.GALLAY, A.BERTHON, « Utilisation des supercondensateurs pour le stockage de l'énergie embarquée : applications transport », CH1728 Rossens, Suisse.
- [27] G.Sartorielli , T.Schneuwlu , J.Auer « Technologies et applications des supercondensateurs » colloque Energies électrique : besoins, enjeux, technologies et applications UTBM, Belfort 18 Juin 2004.
- [28] D.BOUQUAIN, A.MIRAOUI, « Les supercondensateurs : PRINCIPE, MODELISATION ET APPLICATIONS. UTBM, Belfort Cedex-France.
- [29] F.AMROUCHE, B.MAHMAH, M.BELHAMEL et H.BENMOUSSA, « Modélisation d'une pile à combustible PEMFC alimentée directement en hydrogène-oxygène et validation expérimentale », Rev.Energ.Ren.Vol.8, 2005.
- [30] S.BELKEHAL, « Conception & Commande Des Machines à Aimants Permanents Dédiées aux Energies Renouvelables », Doctorat de l'Université De Constantine, 2010
- [31] 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 M^{ed} Boudiaf M'SILA, 2005.
- [32] A.DECHOUCHA, T.DJDIDI, « Commande par mode de Glissement par Imposition des Pôles d'une Machine à Induction Linéarisée par Orientation du flux » ; mémoire d'ingénieur d'état en Génie électrique ; Université Mohamed Boudiaf de M'SILA ; 2005.

Bibliographie

- [33] M. Y. Ayad, M. Becherif, A. Henni, M. Wack and A. Aboubou; "Sliding Mode Control applied to Fuel Cell, Supercapacitors and Batteries for Vehicle Hybridizations ", IEEE International Conference on Energy and Exhibition (EnergyCon), Manama, Bahrain, December 2010, pp. 478- 483.
- [34] A.ACHOUR, A.AICHOUCHE ; « Réglage par mode glissant d'une machine asynchrone », Université MOHAMED BOUDIAF, MSILA, 2005.
- [35] 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), May 2007, Capri, Italy, pp. 500-505.

Résumé

Résumé du Thème

Les piles à combustible ressemblent de près aux batteries, sachant que les deux éléments produisent une tension continue à leurs bornes en utilisant un procédé électrochimique.

Deux électrodes séparées par un électrolyte forment une anode et une cathode, une paire appelée une cellule. Les groupes de cellules produisent une puissance et une tension utilisables. Contrairement aux batteries, les piles à combustible convertissent l'énergie de ce combustible riche en hydrogène directement en électricité. Elles fonctionnent tant qu'elles sont alimentées avec du carburant. En outre, elles ont une grande constante de temps pour répondre à une augmentation ou une diminution de la puissance de sortie. Elles constituent un environnement propre, calme, et une manière efficace pour produire de l'électricité. Elles ont besoin de certains types de circuits de conditionnement de puissance pour être utile.

L'utilisation des supercondensateurs en tant que système de stockage de sources hybrides, en utilisant des piles à combustible ou des batteries, est tout à fait appropriée, permet un rasage de charge de pointe et compense les limites intrinsèques de la source principale.

Notre travail traite la conception des sources d'énergie hybride utilisant une pile à combustible comme source principale, une liaison à courant continu et des supercondensateurs comme source d'énergie transitoire pour la traction du véhicule.

Mots Clés :

Pile à combustible, supercondensateurs, régulateur PI, contrôle par mode glissant, véhicule hybride, hacheur « boost », hacheur « Buck-boost », bus continu,....etc.

Abstract:

Fuel cells are similar to batteries, knowing that both elements generate a voltage at their terminals using an electrochemical process.

Two electrodes separated by an electrolyte; they form an anode and a cathode, a pair called a cell. The groups of cells had an output and a voltage used.

Unlike batteries, fuel cells convert the energy of the hydrogen rich fuel directly into electricity. They work as they are supplied with fuel.

Résumé

In addition, they have a large time constant to respond for an increase or decrease power output.

They are a clean, quiet, and efficient way to produce electricity. They need some kind of power conditioning circuits to be useful.

The use of supercapacitors as a storage system for hybrid sources, using fuel cells or batteries, is quite appropriate, can shave peak load and compensates for the intrinsic limitations of the main source.

Our work deals the design of hybrid energy sources, using a fuel cell as the primary source, a DC link and ultracapacitors as an energy source for the vehicle traction.

Tags:

Fuel cells, Supercapacitors, PI controller, Sliding mode control, hybrid vehicle, chopper "boost" chopper "Buck-boost" DC Bus, etc.